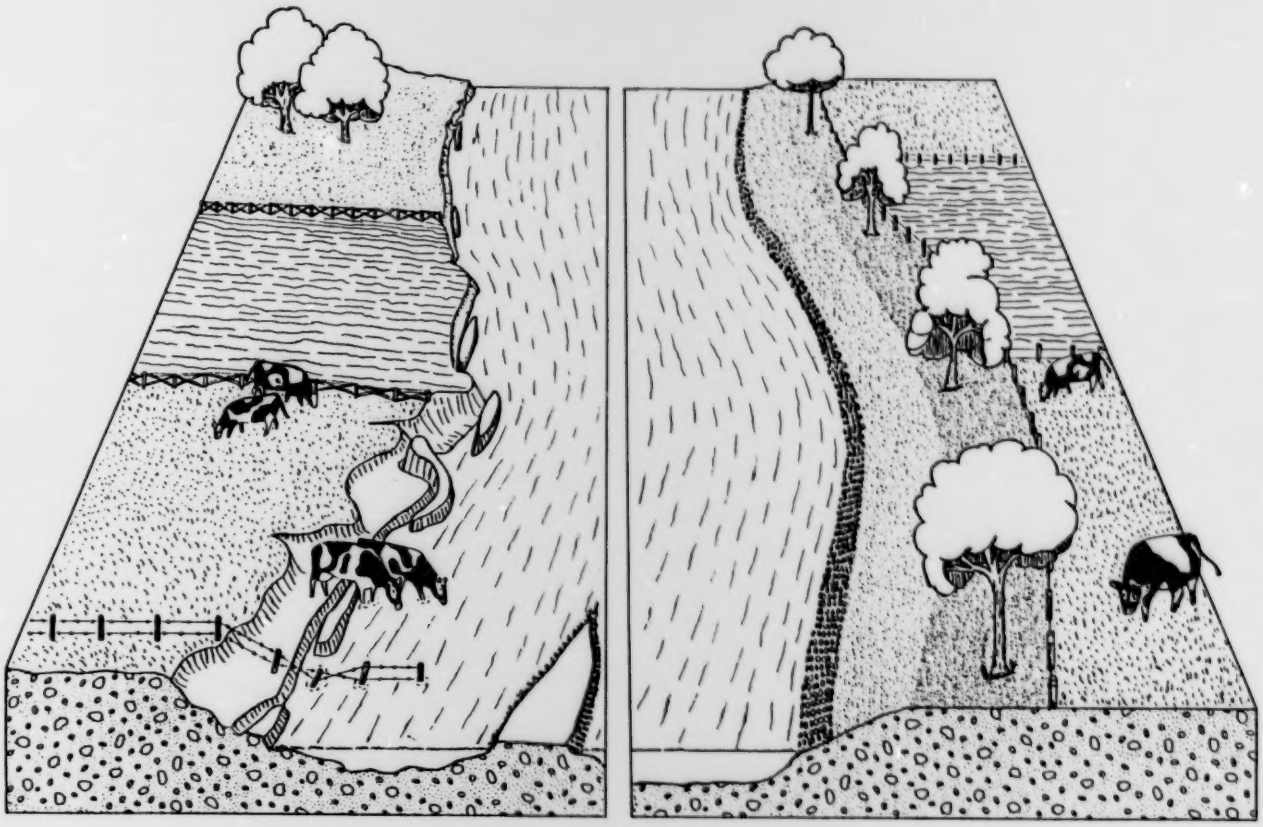
GUIDE D'ANALYSE ET D'AMÉNAGEMENT DE COURS D'EAU À DES FINS AGRICOLES

Deuxième édition



Québec

89-02245/

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DES PÊCHERIES
ET DE L'ALIMENTATION DU QUÉBEC

GUIDE D'ANALYSE ET D'AMÉNAGEMENT DE COURS D'EAU À DES FINS AGRICOLES

DEUXIÈME ÉDITION

FÉVRIER 1988

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Québec
Premier trimestre 1988
ISSN 2-551-06852-5

PRÉFACE

En février 1986, le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation publiait le **Guide d'analyse et d'aménagement de cours d'eau à des fins agricoles** dans un objectif de conservation des sols et dans un souci de respect des normes minimales de protection de l'environnement.

Le personnel technique du Ministère s'est alors fait un point d'honneur non seulement de préparer des projets conformes aux recommandations de ce guide, mais aussi de faire des propositions pour en améliorer le contenu.

Aussi, avons-nous jugé bon de mettre sur pied un comité permanent de révision de ce guide afin d'y apporter les corrections qui s'imposent et de le maintenir continuellement à la fine pointe du développement technologique en matière d'aménagement de cours d'eau. Avec cette deuxième édition, le Ministère veut mettre à la disposition de son personnel technique et de toute autre personne intéressée un document offrant un éventail de solutions mieux adaptées aux problèmes rencontrés.

Je tiens à souligner l'effort des membres du comité pour la rédaction de cette deuxième édition et celui de notre personnel technique pour la mise en application du guide dans l'élaboration des projets, et je les félicite tous.

J'invite donc le personnel technique du Ministère à utiliser dès maintenant cette deuxième édition et à continuer à oeuvrer pour que le programme d'aménagement des cours d'eau contribue à la conservation et à la mise en valeur des terres agricoles du Québec, et cela dans le respect des normes environnementales.

Le Sous-ministre adjoint
Production et Affaires régionales

GUY JACOB

NOTES SUR LES AUTEURS

La version originale de février 1986 s'inspirait des deux documents suivants:

- Guide d'aménagement de cours d'eau en milieu agricole, Service des analyses d'impact sur le milieu agricole, Direction de protection du territoire agricole, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, mars 1985, non publié.

- Aménagement de cours d'eau, Comité spécial de la section hydraulique de la Commission de génie rural du Conseil des productions végétales du Québec, mars 1985, non publié.

La première version de février 1986 a été conçue par:

Robert Beaulieu, ingénieur et agronome
Guy Beauregard, agronome
Jocelyn Cantin, agronome
Camille Caron, géographe
Maurice Demers, ingénieur
David Fisk, ingénieur et agronome
Mario Laroche, ingénieur
Richard Laroche, ingénieur et agronome
Côme Nolet, ingénieur
Régis Potvin, ingénieur et agronome
Donald Roussy, ingénieur et agronome
Pierre Samson, biologiste
Jacques Vézina, ingénieur

La présente version révisée de février 1988 a été élaborée par:

Robert Beaulieu, ingénieur et agronome
Carol Drouin, ingénieur
David Fisk, ingénieur et agronome
Mario Laroche, ingénieur
Richard Laroche, ingénieur et agronome
Régis Potvin, ingénieur et agronome
Pierre Samson, biologiste
Luc Vézina, agronome

avec la participation de:

Jacques Champagne, responsable de l'édition
France Dupont et Johanne Toupin au traitement de textes
Pierre Caron, Sébastien Cartier et Denis Brière au graphisme

TABLE DES MATIÈRES

		Page
CHAPITRE 1	**CONTEXTE D'INTERVENTION**	1-1
CHAPITRE 2	**ÉTUDES PRÉLIMINAIRES**	2-1
2.1	Analyse sommaire de la demande	2-4
2.2	Étude de faisabilité	2-6
2.3	Analyse avantages-inconvénients et recommandations	2-16
CHAPITRE 3	**ÉTUDE HYDROLOGIQUE**	3-1
3.1	Hydrologie	3-6
3.2	Paramètres utilisés dans les méthodes d'évaluation des débits de pointe	3-7
3.3	Évaluation des débits de pointe pour les petits bassins versants (superficie inférieure à 15 km^2)	3-17
3.4	Évaluation des débits de pointe pour les grands bassins versants (superficie supérieure à 15 km^2)	3-22
3.5	Débit d'étiage	3-30
3.6	Modification des hydrogrammes	3-32
3.7	Annexe 1: Pluie maximale d'une durée de 6 heures	3-35
3.8	Annexe 2: Exemple de calcul	3-45
3.9	Annexe 3: Liste des paramètres utilisés dans le chapitre 3	3-65
CHAPITRE 4	**CONCEPTION D'UN PROJET D'AMÉNAGEMENT DE COURS D'EAU**	4-1
4.1	Généralités	4-6
4.2	Conception hydraulique	4-12
4.3	Stabilité mécanique des sols	4-36
4.4	Correction de la pente longitudinale par l'aménagement de seuils	4-64
4.5	Tolérances d'exécution	4-65
4.6	Annexe 1: Exemples de calculs	4-67
4.7	Annexe 2: Propriétés géométriques des canaux	4-87
4.8	Annexe 3: Liste des paramètres utilisés dans le chapitre 4	4-89

Page

CHAPITRE 5 IMPACTS ET MESURES DE MITIGATIONS 5-1

5.1 Impacts 5-6
5.2 Avantages des mitigations 5-7
5.3 Description des mitigations 5-9
5.4 Annexe 1: Exemples d'interventions en milieu boisé 5-44

CHAPITRE 6 OUVRAGES ET PRATIQUES PERMETTANT D'ASSURER LA DURABILITÉ DE L'AMÉNAGEMENT 6-1

6.1 Protection d'une berme 6-4
6.2 Accès des animaux 6-5
6.3 Les ponceaux 6-8
6.4 L'entretien des cours d'eau 6-25
6.5 Annexe 1: Exemple de dimensionnement d'un ponceau 6-29

BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 1

CONTEXTE D'INTERVENTION

LISTE DES TABLEAUX

		Page
1.1	Intervenants dans un projet d'aménagement de cours d'eau	1-7

LISTE DES FIGURES

1.1	Projet d'aménagement de cours d'eau municipaux à des fins agricoles cheminement d'analyse et de conception	1-8

1 CONTEXTE D'INTERVENTION

Les eaux de ruissellement forment, par leur réunion sur la ligne basse des terrains, une eau coulant à découvert qu'on appelle ruisseau, cours d'eau, rivière.

Toute rivière ou cours d'eau naturel, dans ses parties non navigables ni flottables, est un cours d'eau municipal. Une rivière ou un cours d'eau naturel, qui n'est flottable qu'à certaines époques de l'année ou après les pluies, ne cesse pas d'être un cours d'eau municipal. Un projet d'aménagement de cours d'eau municipal, dans le sens le plus large, est une action planifiée sur un cours d'eau municipal visant le contrôle de l'écoulement des eaux.

Les composantes du milieu sont d'ordre juridique, social, politique, biophysique et économique. Ces composantes constituent l'environnement global des projets d'aménagement de cours d'eau municipaux. La connaissance de ces composantes donne une vision systématique au gestionnaire d'un projet d'aménagement et lui permet de prévoir les impacts possibles du projet. Une brève description de chacune des composantes est donnée dans cette introduction. Pour une perception plus complète de l'aménagement des projets de cours d'eau municipaux, le lecteur* devra se référer aux différents chapitres et annexes de ce guide, de même qu'à toute documentation traitant de cours d'eau et d'aménagement de cours d'eau.

La composante juridique des projets d'aménagement de cours d'eau municipaux est complexe et un nombre impressionnant d'articles de lois et de règlements touchent le sujet de façon directe ou indirecte. L'usage de l'eau est relié à l'exercice de la propriété foncière et les articles 502 et 503 du Code civil sont explicites à cet égard. La présence d'un cours d'eau sur un terrain apporte une servitude réelle vis-à-vis les fonds supérieurs, tel que le stipule l'article 501 du Code civil. "Les cours d'eau municipaux sont sous la direction et la juridiction des corporations municipales dans lesquelles ils sont situés". S'ils traversent plusieurs municipalités de comté, "ils sont sous la juridiction conjointe des corporations de ces municipalités de comté, représentées par le bureau des délégués" (art. 714 du Code municipal).

* Dans ce document, le masculin inclut le féminin lorsque cela s'applique.

En d'autres termes, le conseil d'une corporation municipale contrôle, dirige, administre et a la discrétion et les pouvoirs d'ordonner des travaux dans un cours d'eau municipal sous sa juridiction si les intéressés le demandent ou s'il est jugé à propos de le faire pour le bien de la collectivité.

Dans le cas d'une cité ou ville, le conseil municipal peut, par règlement, ordonner de tels travaux et si le cours d'eau coule en s'étendant également à une corporation municipale régie par le Code municipal, le règlement est adopté par la corporation municipale de comté, la ville ou cité étant alors régie par le Code municipal (art. 413 par. 27 - Loi des cités et villes).

Il existe également des lois et règlements qui affectent les projets d'aménagement de cours d'eau municipaux. La Loi sur le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, la Loi sur la qualité de l'environnement, la Loi des Pêcheries, la Loi sur le régime des eaux, la Loi sur la protection du territoire agricole, le schéma d'aménagement de la M.R.C., la Loi de la conservation de la faune et la Loi sur les terres et forêts ne sont que quelques-unes des lois et des règlements qui touchent sur certains points l'aménagement des cours d'eau municipaux.

La composante sociale des projets d'aménagement de cours d'eau regroupe l'ensemble des intervenants du milieu affectés par un projet. Ces intervenants sont les agriculteurs intéressés, les autres riverains, le conseil municipal, les représentants d'organismes d'utilité publique, les représentants de différents ministères du gouvernement, les représentants d'unions, d'associations ou de divers regroupements. Lors de la présentation du projet, l'assemblée des intéressés permet aux intervenants d'exposer leurs points de vue et d'échanger des idées sur des solutions possibles aux divers problèmes soulevés.

La composante politique est une sous-composante sociale d'un projet d'aménagement. La composante politique est constituée par les différents niveaux de gouvernement: municipal, provincial et fédéral. Les priorités que se fixe un palier de gouvernement influencent la gestion et la réalisation des projets.

La composante biophysique concerne tout l'environnement biologique et physique du cours d'eau. La connaissance de cette composante permet de prévoir les mesures de mitigation qui feront partie du projet d'aménagement.

En dernier lieu, la composante économique traite des conséquences financières directes à court et à long termes du projet. Elle fait partie de l'analyse avantages-inconvénients sans constituer le seul critère d'admissibilité.

Le gestionnaire de projets d'aménagement de cours d'eau municipaux doit percevoir le contexte global de ces projets. Il se doit de connaître les intervenants, les interventions et les interactions possibles d'un projet particulier sur le milieu. L'une de ses tâches consiste à faire le lien entre les différents intervenants engagés dans un projet et à coordonner les efforts de chacun en vue de la réalisation harmonieuse du projet. Le tableau 1.1 présente les intervenants les plus susceptibles d'être concernés lors d'un projet d'aménagement de cours d'eau municipal.

La figure 1.1 illustre le cheminement d'analyse et de conception que le présent guide suggère aux gestionnaires de projets depuis la réception de la demande jusqu'à la réalisation complète du projet.

Si le projet prévoit seulement un entretien et un retour à la ligne de fond d'un cours d'eau déjà réglementé et sur lequel il n'existe pas de contrainte particulière (stabilité, érosion, inondation, faune), la procédure proposée peut être simplifiée.

Pour plus de précision, on peut définir les termes suivants;

Aménagement: Travaux nécessaires pour réaliser une confection, une réfection ou un entretien d'un cours d'eau utilisé à des fins agricoles.

Confection: Première intervention dans un cours d'eau suivant un calibrage déterminé en fonction des besoins agricoles et de la qualité du milieu.

Réfection: Nouvelle intervention dans un cours d'eau pour un recalibrage nécessité par de nouveaux besoins.

Entretien: Travaux légers de nettoyage visant à maintenir la section d'écoulement libre d'obstacles.

TABLEAU 1.1

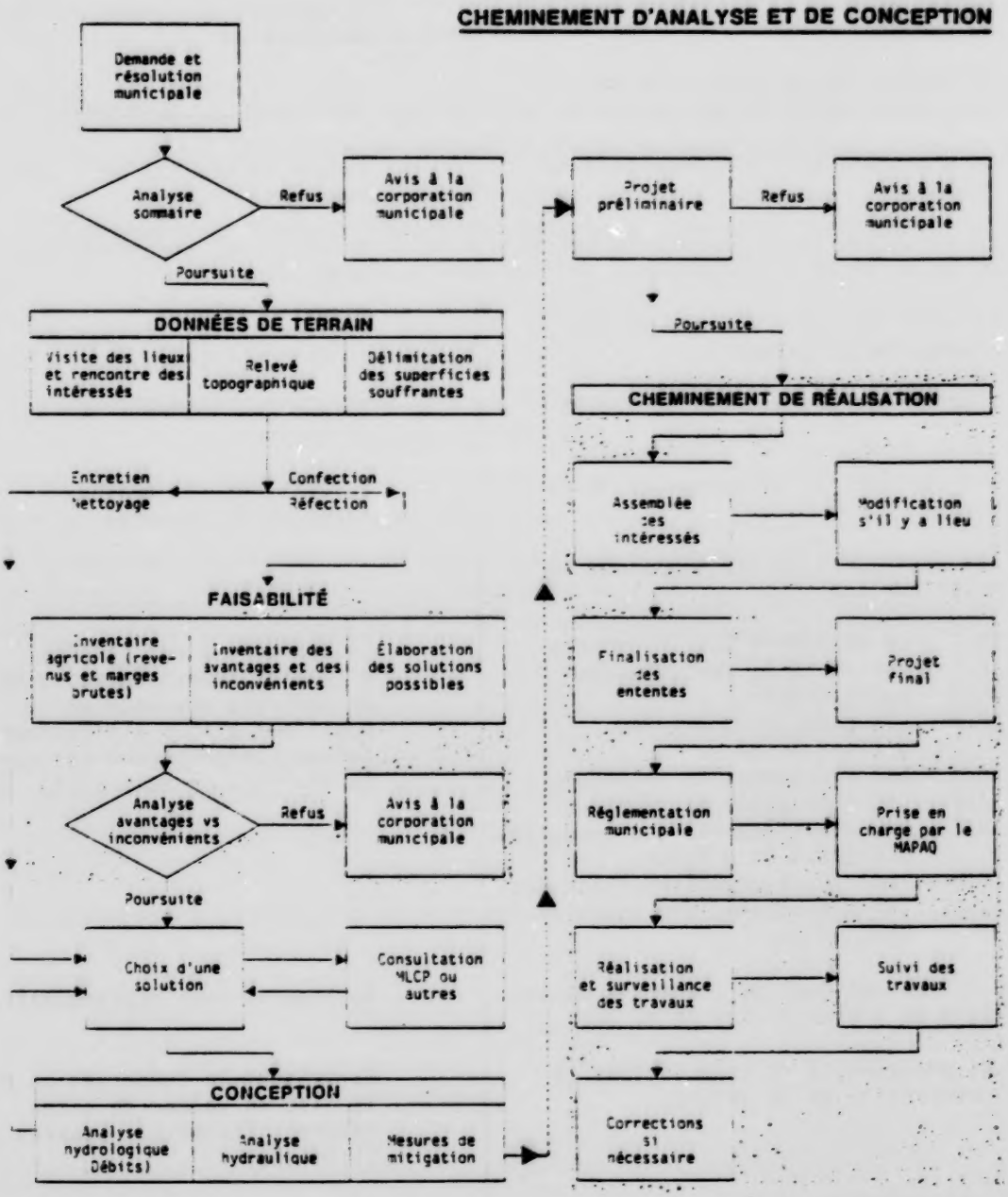
Intervenants dans un projet de cours d'eau

INTERVENANTS	INTERVENTIONS
1 - La corporation municipale	Réglemente et ordonne les travaux
2 - Les producteurs agricoles	Font la demande
3 - Le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec	Fournit une aide technique et financière aux corporations municipales
4 - La Commission de protection du territoire agricole du Québec	Assure la protection du territoire agricole
5 - Le ministère de l'Environnement du Québec	Assure la qualité de l'environnement
6 - Le ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche	Prévient les problèmes fauniques
7 - Le ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec	Réglemente les travaux en forêts publiques
8 - L'Union des producteurs agricoles	Défend les intérêts des agriculteurs
9 - Les sociétés de conservation de la forêt	Surveillent les travaux en forêt et à proximité
10 - Les organismes et ministères de services publics	
10.1 - Le ministère des Transports 10.2 - Les sociétés ferroviaires 10.3 - Hydro-Québec 10.4 - Les compagnies privées d'électricité 10.5 - Les compagnies de téléphone 10.6 - Les compagnies de pipelines 10.7 - Les propriétaires des conduites d'aqueduc et d'égout 10.8 - Tout autre organisme ayant des infrastructures croisant le cours d'eau	Se conforment aux besoins d'assainissement agricole et de contrôle des eaux et modifient s'il y a lieu leurs infrastructures pour assurer la réalisation du projet
11 - L'Office national de l'énergie et la Régie de l'électricité et du gaz	Appliquent leur réglementation
12 - Les groupements et associations de conservation de la nature	Favorisent la conservation et la mise en valeur de sites naturels (Exemple: Canards Illimités)
13 - L'entrepreneur	Exécute les travaux d'aménagement

Figure 1.1

PROJET D'AMÉNAGEMENT DE COURS D'EAU MUNICIPAUX À DES FINS AGRICOLES

CHEMINEMENT D'ANALYSE ET DE CONCEPTION



CHAPITRE 2

ÉTUDES PRÉLIMINAIRES

CHAPITRE 2

ÉTUDES PRÉLIMINAIRES

		Page
2.1	Analyse sommaire de la demande	2-4
2.2	Étude de faisabilité	2-6
2.2.1	Inventaire des données	2-6
2.2.2	Identification des problèmes agricoles et de la superficie souffrante	2-7
2.2.2.1	Identification des problèmes agricoles	2-7
2.2.2.2	Relevés topographiques	2-8
2.2.2.3	Délimitation de la superficie souffrante	2-10
2.2.3	Recherche des options de solution	2-11
2.2.3.1	Choix et analyse des options	2-11
2.2.3.2	Inconvénients appréhendés sur l'environnement	2-14
2.2.3.3	Avantages recherchés pour l'agriculture	2-15
2.3	Analyse avantages-inconvénients et recommandations	2-16
2.3.1	Analyse économique	2-16
2.3.2	Analyse avantages-inconvénients et recommandations	2-19
2.3.3	Exemple de calcul	2-24

LISTE DES FIGURES

		Page
2.1	Suggestion de formulaire d'analyse sommaire d'une demande de cours d'eau	2-5
2.2	Avantages annuels tirés de l'amélioration d'un cours d'eau	2-21

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Marges brutes de différentes cultures	2-20
2.2	Valeur actuelle d'un dollar reçu ou déboursé à la fin de la $n^{ième}$ année	2-22
2.3	Valeur actuelle d'un dollar reçu ou déboursé, année après année, jusqu'à la $n^{ième}$ année	2-23

2 ÉTUDES PRÉLIMINAIRES

2.1 ANALYSE SOMMAIRE DE LA DEMANDE

Sur réception d'une demande d'aménagement de cours d'eau accompagnée de la résolution d'appui de la corporation municipale concernée, une analyse sommaire de l'objet de la demande et un inventaire des aspects suivants doivent être effectués:

1. bien situer le cours d'eau et la partie faisant l'objet d'une demande;
2. avec l'aide des requérants, identifier le but de la demande et les bénéfices espérés;
3. examiner sommairement l'envergure de la demande en termes de longueur, superficie souffrante, superficie totale en cultures, coût approximatif;
4. évaluer l'intensité et le genre d'activités agricoles du bassin ainsi que le zonage.

Cette première évaluation permet d'abord d'éliminer les demandes qui n'ont pas d'intérêt agricole ou qui pourraient être mieux solutionnées par d'autres moyens.

L'analyse de la demande devrait se terminer par une recommandation sur le cheminement à suivre, à savoir:

- procéder à l'étude de faisabilité (en cas de confection ou réfection);
- procéder directement à l'étude technique (entretien seulement);
- refuser la demande.

Cette dernière option devrait être accompagnée d'une note explicative, donnant plus de détails sur les raisons du refus.

FIGURE 2.1

SUGGESTION DE FORMULAIRE D'ANALYSE SOMMAIRE D'UNE DEMANDE DE COURS D'EAU

A) IDENTIFICATION

Dossier no : _____
Cours d'eau: _____
Municipalité (s): _____
M.R.C.: _____ C.E.: _____

DATE DE LA DEMANDE: _____

B) LOCALISATION - annexer une carte cadastrale ou une photo aérienne à l'échelle 1:20000 localisant le cours d'eau demandé

C) IDENTIFICATION DU PROBLÈME (Voir principal intéressé)

_____
_____
_____

D) ENVERGURE DE LA DEMANDE

Longueur approximative à améliorer: _____
☐ déjà subventionné en 19__ ; ☐ jamais subventionné
Nombre d'agriculteurs affecté: _____
Superficie souffrante: _____ ha (approx.)
Coût préliminaire prévu: _____

E) ASPECT AGRONOMIQUE DU SECTEUR AFFECTÉ

Élevages principaux: _____
_____
Cultures prédominantes: _____
_____
Intensité d'activité agricole: ☐ progressif ☐ stable ☐ marginal ☐ à l'abandon
Zonage agricole _____ % en zone protégée

F) ÉVALUATION

L'intervention demandée
☐ aurait des bénéfices agricoles importants et immédiats
☐ aurait des bénéfices agricoles moyens
☐ aurait des bénéfices agricoles faibles ou seulement à long terme
☐ n'aurait que peu ou pas de bénéfices agricoles

G) RECOMMANDATION

Compte tenu de cette évaluation, je recommande:
☐ de procéder à l'étude de faisabilité
☐ de procéder à l'étude technique
☐ de refuser la demande (voir note explicative)

H) REMARQUES (points à clarifier, commentaires)

_____
_____
_____
_____

_____ Signature: _____
Date

2.2 ÉTUDE DE FAISABILITÉ

Si la demande est retenue, une étude plus complète, c'est-à-dire l'étude de faisabilité doit être effectuée. Celle-ci se fait en considérant le bassin versant en général, et les secteurs affectés en particulier. Le processus peut être divisé en quatre opérations:

1) un inventaire des données;
2) l'identification des problèmes agricoles et des superficies souffrantes;
3) la recherche des options de solution;
4) l'analyse avantages-inconvénients et les recommandations.

2.2.1 Inventaire des données

Cette opération comprend, entre autres, selon les besoins:

- la délimitation et la topographie du bassin versant;
- l'identification du réseau hydrographique;
- la compilation des données hydrologiques;
- l'inventaire de l'utilisation actuelle du sol;
- l'évaluation du potentiel des lieux (agricole, forestier, urbain, faunique, récréatif, etc.);
- la localisation des secteurs fauniques (frayères, aires d'alimentation, aires de nidification, prises d'eau) par le ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche;
- la localisation des secteurs dégradés (érosion du lit, berges effondrées, inondations, mauvais drainage, sédimentation, méandres, etc.);
- l'identification des plans de drainage souterrain existant;
- le nombre et les noms des riverains affectés;
- le nombre d'agriculteurs affectés et leur production.

Cet inventaire est fait à partir des différentes cartes et documents disponibles, par exemple:

- la demande d'aide;
- les cartes de zones agricoles permanentes des municipalités touchées;
- les photographies aériennes;
- les cartes cadastrales du ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec à l'échelle 1:20 000;
- les cartes d'utilisation du sol: M.A.P.A.Q. 1:50 000;
- les cartes cadastrales agrandies du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec à l'échelle 1:5 000;
- les cartes topographiques à l'échelle 1:50 000 ou 1:20 000;
- les cartes et rapports pédologiques;
- les cartes des potentiels agricoles des sols ARDA 1:50 000;
- les cartes hydrographiques;
- les cartes routières: M.T.Q. 1:50 000 et 1:125 000;
- les plans de drainage souterrain;
- les plans de ferme;
- les dossiers de cours d'eau municipaux.

2.2.2 Identification des problèmes agricoles et de la superficie souffrante

La première étape de cette deuxième opération est la visite des lieux et une rencontre avec les demandeurs. Des documents de nature cartographique (photos aériennes, cartes 1:5 000, etc.) devraient être utilisés lors de cette visite. Après discussion et observation, les évaluations suivantes peuvent être faites:

2.2.2.1 Identification des problèmes agricoles

Les problèmes rencontrés le plus fréquemment sont les suivants:

- manque de profondeur pour les sorties de drainage souterrain;
- capacité insuffisante d'évacuation des crues en période de culture;

- profondeur insuffisante pour recevoir les fossés;
- érosion des talus et du fond;
- détérioration et/ou sédimentation du cours d'eau qui empêchent l'écoulement normal;
- inondation périodique des champs avoisinants;
- superficie non cultivable à cause d'une nappe phréatique élevée;
- obstructions naturelles (barrages de castors, crans rocheux, glissement des talus, végétation abondante, méandres, etc.) ou obstructions artificielles (barrages, digues, déchets, ponceaux non appropriés ou mal installés, etc.) qui font monter le niveau d'eau;
- problèmes autres qu'agricoles (inondation de routes, de sous-sols des maisons, etc.).

La plupart du temps, c'est une combinaison de plusieurs de ces problèmes qui sont à l'origine de la demande d'aide. (Si le problème est uniquement de nature autre qu'agricole, normalement le projet devrait être refusé lors de l'analyse sommaire de la demande).

2.2.2.2 Relevés topographiques

Le relevé topographique doit fournir les renseignements pertinents suivants et leur localisation:

- limites du bassin versant;
- lignes de lots, de rangs, de municipalités;
- routes (chaînage au centre, nature et élévation du pavage, largeur de l'emprise);
- chemin de fer (largeur de l'emprise, plan et section en travers, milliaire);
- ponts et ponceaux (description, état de la construction, niveaux aval et amont, élévation du radier aval, longueur du pont);

- sorties de drainage souterrain (description, état, élévation, chaînage, rive);
- sorties de drainage superficiel (description, état, élévation, chaînage, rive);
- limite de la zone souffrante (vérification, précision);
- pentes naturelles des cours d'eau;
- géométrie des sections;
- réseaux de transport et de distribution hydro-électrique, téléphonique et télégraphique aériens ou souterrains (localisation précise);
- réseaux d'aqueduc, d'égout, gazoducs, oléoducs (diamètre du tuyau, élévation du dessus et angle de croisement avec le cours d'eau);
- bâtiments situés à proximité du cours d'eau;
- clôtures (longeant et traversant le cours d'eau);
- délimitation des champs cultivés et types de culture;
- boisés (longueur de rive, espèces, état);
- zones instables ou dégradées;
- pédologie;
- présence de frayères, aires d'alimentation, de repos et de nidification;
- fosses et rapides (localisation, dimensions et niveaux);
- marécages, lacs et battures;
- plaine de débordement (limites);
- prise d'eau (localisation, importance);
- barrages (localisation, description, nature, élévation de la crête et du réservoir).

De façon particulière, les mesures doivent être prises aux 50 mètres d'intervalle ou aux changements de pente et doivent être reliées aux repères de nivellement géodésiques officiels à moins de contraintes majeures.

2.2.2.3 Délimitation de la superficie souffrante

La délimitation de la superficie souffrante est très importante afin d'évaluer sérieusement les avantages d'un projet.

La superficie souffrante inclut les superficies inondées et les superficies avec nappe phréatique élevée à cause de l'absence ou du mauvais état du cours d'eau. Le cas échéant, elle peut aussi inclure la superficie perdue à cause des méandres.

Les superficies inondées au printemps ou périodiquement durant la saison de culture sont les plus facilement identifiables lors d'une visite au moment de la crue. Si ce n'est pas possible, la photo-interprétation et les observations du propriétaire sont aussi des sources de renseignements indispensables. Les zones de nappe phréatique élevée sont souvent identifiables par la végétation typique des terrains mal drainés (les carex par exemple) ou par la partie des champs non récoltés. Toutes ces limites peuvent être tracées sur une carte appropriée (l'échelle 1:5000 convient bien) lors de la visite des lieux.

Il faut différencier une zone directement influencée par un cours d'eau d'une zone améliorée par voie de drainage souterrain: un réseau de fossés ou un cours d'eau ne remplace pas le drainage souterrain.

En résumé, la superficie souffrante doit être limitée à la zone réellement et directement affectée par le mauvais état du cours d'eau.

Généralement, la zone souffrante (superficie à améliorer) devra être délimitée par la ligne qui ne dépasse pas un (1) mètre d'élévation par rapport au terrain près du cours d'eau. S'il est prévu qu'une plus grande superficie bénéficierait du projet grâce à du drainage souterrain ou superficiel, il faut inclure les coûts additionnels globaux (sans subvention) de ceux-ci dans le projet avant de comptabiliser les bénéfices.

La figure 2.2 illustre un mode pratique de présentation de l'inventaire des cultures et de l'estimation des rendements actuels.

2.2.3 Recherche des options de solution

Le fait que la demande soit basée sur des problèmes agricoles ne justifie pas automatiquement le creusage du cours d'eau. Dans certains cas, des objectifs contradictoires peuvent exister. Un groupe veut drainer, l'autre groupe veut protéger un habitat faunique particulier et un autre groupe peut être contre toute intervention sur l'environnement naturel, peu importe le projet. Devant cette situation, toutes les possibilités doivent être étudiées soigneusement en évaluant les avantages espérés et les inconvénients appréhendés.

À ce stade-ci, certains projets peuvent être mis de côté parce que les avantages ne sont pas supérieurs aux inconvénients, soit au point de vue coût ou au point de vue impact sur l'environnement. Lorsque les avantages justifient la préparation d'un projet, les efforts doivent être dirigés de façon à éliminer ou à minimiser les inconvénients.

2.2.3.1 Choix et analyse des options

L'analyse des solutions doit être effectuée en considérant le principe fondamental suivant: à coût actualisé comparable, on doit favoriser la solution qui minimise l'intervention sur le cours d'eau.

Parmi ces possibilités, on trouve entre autres:

a) Creusage

La solution la plus avantageuse dans bien des cas est encore le creusage du cours d'eau. Le succès et l'amélioration de l'agriculture dépendent souvent de l'évacuation rapide et efficace de l'excès d'eau dans le sol. L'aménagement et l'entretien des cours d'eau municipaux demeurent une préoccupation fondamentale et essentielle.

Lorsque le creusage est indispensable, diverses pratiques doivent être intégrées au projet pour minimiser les inconvénients, entre autres:

- le déboisement sur une rive seulement du cours d'eau (préférablement le côté nord ou est afin de maintenir de l'ombre sur le cours d'eau pour éviter le réchauffement de l'eau);

- l'élargissement sur un talus seulement afin de minimiser les effets d'érosion;

- le choix de la période de creusage pour protéger la vie aquatique, pour minimiser le compactage et les pertes de récoltes, et pour faciliter une repousse de la couverture végétale;

- le creusage progressif sur terrain inondé, afin de minimiser les dommages (érosion, sédimentation) causés par une évacuation trop rapide des eaux;

- la consultation avec les riverains pour connaître leurs préoccupations.

Le projet doit prévoir parfois des structures et des mesures de mitigation telles que: enrochement des talus, ensemencement des talus, seuils de dissipation d'énergie, rampes d'accès pour abreuver les animaux, clôtures, bassins de sédimentation, etc. Ces sujets seront élaborés plus loin dans ce guide.

b) Intervention intermittente

Beaucoup de cours d'eau peuvent être creusés sur une partie seulement de leur longueur, tout en conservant la même efficacité pour les terrains cultivés. Quand la pente longitudinale est choisie pour évacuer l'eau en amont et que la profondeur est déjà appropriée, le concepteur doit éviter de recommander le creusage pour les seules raisons d'apparence ou de continuité.

En terrain boisé, l'amélioration du cours d'eau doit se limiter à donner la pente et la section requises pour le drainage des champs en amont. Les bénéfices agricoles réalisés en drainant des superficies boisées sont minimes, mais l'impact négatif sur la faune peut être accentué à ces endroits.

L'intervention intermittente est un des moyens les plus intéressants de minimiser les inconvénients tout en réduisant les coûts.

c) Collecteurs communautaires

Cette solution est surtout utilisée quand un collecteur de drainage souterrain doit traverser plusieurs terres avant d'atteindre le cours d'eau. Dans ce cas, le collecteur est dimensionné de manière à capter toute l'eau des systèmes avoisinants, éliminant ainsi la nécessité de creuser un cours d'eau trop profond.

De plus, ce concept peut être utilisé lorsque la profondeur d'un cours d'eau n'est pas suffisante pour bien recevoir un collecteur de drainage souterrain. Il s'agit alors d'installer un collecteur communautaire reliant plusieurs collecteurs particuliers et de l'acheminer plus en aval, là où la topographie est plus favorable. Le fait de procéder par collecteur communautaire ou par la simple prolongation du premier collecteur, peut éliminer la nécessité d'approfondir le cours d'eau.

À cause de son coût déjà important, le collecteur communautaire est normalement réservé à l'évacuation de l'eau souterraine et non de l'eau de surface. Ainsi, le but du drain communautaire n'est pas d'éliminer le cours d'eau complètement, mais plutôt d'éviter les profondeurs excessives.

d) Stations de pompage

Malgré son coût parfois élevé, cette solution est particulièrement utile sur terrain plat car elle permet d'évacuer les eaux des systèmes de drainage souterrain sans augmenter excessivement la profondeur du cours d'eau. De plus, dans certains cas où l'on prévoit des impacts environnementaux sérieux liés au creusage des cours d'eau, la station de pompage doit être l'option à privilégier.

2.2.3.2 Inconvénients appréhendés sur l'environnement

L'aménagement d'un cours d'eau entraîne souvent des modifications majeures sur le lit et les berges du cours d'eau ainsi que sur son régime hydraulique.

Ces modifications ou impacts peuvent avoir des répercussions sérieuses sur la qualité du milieu, et sur la flore et la faune qui occupent ce milieu. Au chapitre 5, une liste de tous les impacts prévisibles est présentée avec une description sommaire des effets sur le milieu.

2.2.3.3 Avantages recherchés pour l'agriculture

En contrepartie des inconvénients appréhendés, il est important de bien identifier et noter les avantages agricoles recherchés. Lors de la délimitation de la superficie souffrante, il faut noter aussi la nature et le niveau actuel de production sur cette superficie (espèces, rendements). Ensuite, pour chacune de ces mêmes surfaces, les avantages agricoles recherchés doivent être identifiés et quantifiés (cultures et rendements anticipés). Ces informations sont compilées par tronçons de cours d'eau homogènes. (La figure 2.2 illustre la façon de présenter la situation). Les rendements actuels et anticipés peuvent être basés sur des barèmes de la Régie des assurances agricoles du Québec pour le territoire concerné. Le mode de classement des données ainsi que la méthode d'analyse seront le sujet de la section suivante qui traite d'étude avantages-inconvénients.

L'évaluation des avantages agricoles recherchés s'inspire directement des objectifs visés par les agriculteurs requérants. Cependant, ces objectifs doivent être sérieusement évalués. Ainsi, dans un milieu peu dynamique, on ne peut espérer de façon réaliste un changement radical dans le choix des cultures pour le seul fait d'aménager le cours d'eau. L'intensité des pratiques culturales et le niveau des rendements actuels observés sur chaque ferme doivent servir d'indication dans l'élaboration du scénario anticipé.

Dans certains cas évidents de sous-utilisation du potentiel actuel des sols agricoles (mauvaise régie des champs ou autres...) des possibiltés différentes du projet demandé peuvent être proposées aux

agriculteurs (choix de cultures, éradication des mauvaises herbes, fertilisation accrue, aménagement de pâturages...).

S'il y a lieu, l'intérêt socio-économique d'une intervention doit être identifié. À titre d'exemple, l'aménagement d'un cours d'eau ayant pour but d'assurer le maintien ou le développement de l'activité agricole dans une municipalité, peut être recommandable même s'il présente une rentabilité douteuse au plan microéconomique.

2.3 ANALYSE AVANTAGES-INCONVÉNIENTS ET RECOMMANDATIONS

2.3.1 Analyse économique

Après avoir analysé toutes les possibilités techniques et leurs coûts, il convient d'élaborer différents scénarios ainsi que leurs conséquences au point de vue économique.

Par définition, un investissement est une dépense immédiate et importante de capital dans l'espoir que cette dernière provoque dans l'avenir des bénéfices égaux ou supérieurs aux sommes investies.

Dans le cas de cours d'eau, il y a nécessairement un décalage dans le temps entre l'investissement et la récupération des sommes investies. Exemple: le creusage d'un cours d'eau est réalisé au cours de l'année 0 (investissement). Les bénéfices économiques ne commenceront à se faire sentir effectivement qu'au moment de la récolte l'été ou l'automne de l'année suivante (l'an 1). Les bénéfices se perpétueront les autres années (an 2, 3, 4, 5, etc.) jusqu'à ce que l'aménagement soit rendu inopérant (fin de la vie utile de l'aménagement).

Afin d'annuler ce décalage, différentes méthodes peuvent être utilisées dont celle de la valeur actuelle nette.

La méthode de la valeur actuelle nette (VAN) consiste à trouver la valeur présente (à l'an zéro) des entrées monétaires additionnelles occasionnées par le projet et d'en soustraire le montant de l'investissement.

De cette définition, il ressort deux éléments importants: la valeur présente et les entrées monétaires additionnelles. Pour déterminer les valeurs présentes, il faut rendre actuelles (actualiser) les entrées monétaires additionnelles (bénéfices) des années 1, 2, 3, etc., afin de les rendre comparables au coût de l'investissement initial.

L'idée de base de ce critère est qu'il est préférable de recevoir un dollar aujourd'hui que plusieurs années plus tard. En effet, à cause du loyer de l'argent, le dollar d'aujourd'hui a une plus grande valeur que celui que l'on recevra plus tard.

Selon la méthode proposée, la marge brute du budget des cultures est considérée comme le bénéfice tiré de cette culture.

La marge brute se définit par le produit brut de la production (rendement multiplié par le prix unitaire) moins les frais variables de cette production (coûts des semences, engrais, pesticides, carburant, etc.).

Puisque la nature des cultures peut changer après l'exécution des travaux et que par conséquent les coûts de production aussi peuvent changer, on ne peut donc pas simplement comparer les produits bruts des cultures. Pour pallier cette différence de coûts de production, le revenu additionnel engendré par l'investissement sera la différence des marges brutes des cultures (voir tableau 2.1).

Ces revenus additionnels se produisant plus tard et année après année, il faut donc les actualiser pour pouvoir les comparer au coût d'investissement du projet.

Les éléments requis pour bien appliquer la méthode sont:

1) une délimitation de la zone d'influence du projet (superficie souffrante);
2) les superficies des cultures pratiquées avant le projet (figure 2.2);
3) les superficies des cultures qui pourront être pratiquées après la réalisation du projet;
4) les marges brutes de ces différentes cultures (voir tableau 2.1);
5) le taux d'actualisation utilisé (pour les projets gouvernementaux, on recommande le taux de rendement des obligations d'épargne soit environ 10%);
6) la vie utile escomptée de l'aménagement;
7) le facteur d'actualisation (voir tableaux 2.2 et 2.3);
8) le coût des différents projets.

Une fois que la superficie et le rendement des cultures pratiquées avant et après l'exécution du projet sont estimés, le tableau 2.1 peut fournir les marges brutes pour les grandes cultures. Il ne faudrait pas négliger cependant comme source d'informations le **"Manuel de références économiques en agriculture du Québec"**, lequel est mis à jour périodiquement et qui traite à la fois des grandes cultures (section 100 à 199) et de l'horticulture (section 200 à 299).

Le facteur d'actualisation est fourni au tableau 2.3 pour une durée de vie donnée et pour un taux d'actualisation donné. Ce taux est habituellement celui des obligations d'épargne de nos gouvernements, soit environ 10% présentement.

La différence entre les totaux des marges brutes (total après moins total avant projet) multipliée par le facteur d'actualisation donnera les avantages actualisés de la réalisation du projet.

Toutefois, s'il est prévu que dans X années, il faudra pratiquer des travaux d'entretien, cette dépense doit être actualisée (en utilisant cette fois le tableau 2.2) et additionnée au coût du projet.

Ainsi, il est possible de comparer les coûts des différents projets (creusage, drain communautaire, station de pompage, etc.) aux avantages (actualisés) escomptés par l'aménagement du cours d'eau.

2.3.2 Analyse avantages-inconvénients et recommandations

Après avoir identifié et quantifié les problèmes agricoles, étudié les solutions possibles et analysé économiquement le projet, on doit logiquement procéder à l'analyse des avantages et inconvénients du projet et des options possibles.

Il n'existe pas de système miracle de comptabilité qui permette d'additionner les avantages de différentes natures d'un projet, d'en soustraire les inconvénients et les coûts pour nous amener à prendre une décision correcte sur le bien-fondé d'aménager un cours d'eau.

Même au plan économique, quelle que soit la méthode utilisée, il ne faut pas s'attendre à ce qu'elle seule puisse décider d'un projet:

- premièrement parce que le gouvernement subventionne bon nombre de ces projets précisément parce qu'il les juge stratégiques ou trop coûteux à supporter par les agriculteurs;

- deuxièmement parce que dans l'appréciation d'un projet ayant des répercussions environnementales, plusieurs éléments ne sont pas quantifiables ou au mieux valorisés de prix fictifs qui sont difficiles à interpréter en parallèle avec les marges brutes des productions agricoles.

TABLEAU 2.1

MARGES BRUTES DE DIFFÉRENTES CULTURES (1987)

Cultures	Prix unitaire $/t	Rendement t/ha	Produits bruts $/ha	Charges variables $/ha	Marges brutes $/ha
Avoine non grainée	203,05	2,6	527,92	349,16	178,76
Blé de printemps non grainé	209,38	3,0	628,13	411,45	216,68
Blé d'automne	201,86	3,4	686,31	447,07	239,25
Blé de printemps panifiable traditionnel	253,11	3,3	835,25	440,78	394,47
Blé de printemps panifiable intensif	234,61	4,5	1 055,75	620,27	435,48
Orge non grainée	190,69	3,3	629,29	370,93	258,36
Maïs-grain	183,54	6,0	1 101,25	679,54	421,71
Maïs-grain	183,54	5,5	1 009,47	670,98	338,49
Maïs-grain	183,54	5,0	917,70	662,41	255,29
Maïs-grain en crib	183,54	6,0	1 001,25	624,13	477,12
Maïs-grain humide (silo, ciment hermétique)	148,58	7,4	1 000,50	608,83	490,66
Maïs-épi humide	109,11	10,1	1 102,05	620,28	481,77
Maïs fourrager	23,00	40,0	920,00	601,61	318,39
Maïs fourrager	23,00	35,0	805,00	588,89	216,11
Maïs fourrager	23,00	30,0	60,00	576,17	113,83
Fève soya zone + 2 500 U.T.M.	250,00	2,7	675,00	421,36	253,64
Canola	220,00	2,2	484,00	359,06	114,94
Foin de mil et luzerne	85,00	6,5	552,50	291,68	260,82
Ensilage de foin préfané	38,20	16,9	645,58	363,32	282,26
Pâturage amélioré	85,00	4,5	382,50	175,00	207,50

SOURCES:
- Budgets de cultures 1987. Direction régionale 04, Nicolet, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.
- Direction de l'économie de la production, Direction générale de l'économie, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.
- Comité de références économiques en agriculture du Québec (C.R.E.A.Q.).

AVANTAGES ANNUELS TIRÉS DE L'AMÉLIORATION D'UN COURS D'EAU

Figure 2.

	CHAÎNAGE No DE LOT		AVANT					APRÈS				
Tronçon	Propriétaire	Superficie	Culture	Rendement actuel	Produit brut	Charges variables	Marge brute	Culture anticipée	Rendement anticipé	Produit brut	Charges variables	Marge brute
TOTAL :		(a)					(b)					(c)

TABLEAU 2.2

VALEUR ACTUELLE D'UN DOLLAR REÇU OU DÉBOURSÉ À LA FIN DE LA N IÈME ANNÉE *

Taux d'actualisation (i)

Nombre d'années (n)

an \ %	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	.907	.890	.873	.857	.842	.826	.812	.797	.783	.770	.756
3	.864	.840	.816	.794	.772	.751	.731	.712	.693	.675	.658
4	.823	.792	.763	.735	.708	.683	.659	.636	.613	.592	.572
5	.783	.747	.713	.681	.650	.621	.594	.567	.543	.519	.497
6	.746	.705	.666	.630	.596	.565	.535	.507	.480	.456	.432
7	.711	.665	.623	.584	.547	.513	.482	.452	.425	.400	.376
8	.677	.627	.582	.540	.502	.467	.434	.404	.376	.351	.327
9	.645	.592	.534	.500	.460	.424	.391	.361	.333	.308	.284
10	.614	.558	.508	.463	.422	.386	.352	.322	.295	.270	.247
11	.585	.527	.475	.429	.388	.351	.317	.288	.261	.237	.215
12	.557	.497	.444	.397	.356	.319	.286	.257	.231	.208	.187
13	.530	.469	.415	.368	.326	.290	.256	.229	.204	.182	.163
14	.505	.442	.388	.341	.299	.263	.232	.205	.181	.160	.141
15	.481	.417	.362	.315	.275	.239	.209	.183	.160	.140	.123
16	.458	.394	.339	.292	.252	.218	.188	.163	.142	.123	.107
17	.436	.371	.317	.270	.231	.198	.170	.146	.125	.108	.093
18	.416	.350	.296	.250	.212	.180	.153	.130	.111	.095	.081
19	.396	.331	.277	.232	.195	.164	.138	.116	.098	.083	.070
20	.377	.312	.258	.215	.178	.149	.124	.104	.087	.073	061
21	.359	.294	.242	.199	.164	.135	.112	.093	.077	.064	.053
22	.342	.278	.226	.184	.150	.123	.101	.083	.068	.056	.046
23	.326	.262	.211	.170	.138	.112	.091	.074	.060	.049	.040
24	.310	.247	.197	.158	.126	.102	.082	.066	.053	.043	.035
25	.295	.233	.184	.146	.116	.092	.074	.059	.047	.038	.030
26	.281	.220	.172	.135	.106	.084	.066	.053	.042	.033	.026
27	.268	.207	.161	.125	.098	.076	.060	.047	.037	.029	.023
28	.255	.196	.150	.116	.090	.069	.054	.042	.033	.026	.020
29	.243	.185	.141	.107	.082	.063	.049	.037	.029	.022	.017
30	.231	.174	.131	.099	.075	.057	.044	.033	.026	.020	.015

* $\frac{1}{(1 + i)^n}$

TABLEAU 2.3

VALEUR ACTUELLE D'UN DOLLAR REÇU OU DÉBOURSÉ, ANNÉE APRÈS ANNÉE, JUSQU'À LA N IÈME ANNÉE *

Nombre d'années (n)

an \ %	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	1.86	1.83	1.81	1.78	1.76	1.74	1.71	1.69	1.67	1.65	1.63
3	2.72	2.67	2.62	2.58	2.53	2.49	2.44	2.40	2.36	2.32	2.28
4	3.55	3.47	3.39	3.31	3.24	3.17	3.10	3.04	2.97	2.91	2.85
5	4.33	4.21	4.10	3.99	3.89	3.79	3.70	3.60	3.52	3.43	3.35
6	5.08	4.92	4.77	4.62	4.49	4.36	4.23	4.11	4.00	3.89	3.78
7	5.79	5.58	5.39	5.21	5.03	4.87	4.71	4.56	4.42	4.29	4.16
8	6.46	6.21	5.97	5.75	5.53	5.33	5.15	4.97	4.80	4.64	4.49
9	7.11	6.80	6.52	6.25	6.00	5.76	5.54	5.33	5.13	4.95	4.77
10	7.72	7.36	7.02	6.71	6.42	6.14	5.89	5.65	5.43	5.22	5.02
11	8.31	7.89	7.50	7.14	6.81	6.50	6.21	5.94	5.69	5.45	5.23
12	8.86	8.38	7.94	7.54	7.16	6.81	6.49	6.19	5.92	5.66	5.42
13	9.39	8.85	8.36	7.90	7.49	7.10	6.75	6.42	6.12	5.84	5.58
14	9.90	9.29	8.75	8.24	7.79	7.37	6.98	6.63	6.30	6.00	5.72
15	10.38	9.71	9.11	8.56	8.06	7.61	7.19	6.81	6.46	6.14	5.85
16	10.84	10.11	9.45	8.85	8.31	7.82	7.38	6.97	6.60	6.27	5.95
17	11.27	10.48	9.76	9.12	8.54	8.02	7.55	7.12	6.73	6.37	6.05
18	11.69	10.83	10.06	9.37	8.76	8.20	7.70	7.25	6.84	6.47	6.13
19	12.09	11.16	10.34	9.60	8.95	8.36	7.84	7.37	6.94	6.55	6.20
20	12.46	11.47	10.59	9.82	9.13	8.51	7.96	7.47	7.02	6.62	6.26
21	12.82	11.76	10.84	10.02	9.29	8.65	8.08	7.56	7.10	6.69	6.31
22	13.16	12.04	11.06	10.20	9.44	8.77	8.18	7.64	7.17	6.74	6.36
23	13.49	12.30	11.27	10.37	9.58	8.88	8.27	7.72	7.23	6.79	6.40
24	13.80	12.55	11.47	10.53	9.71	8.98	8.35	7.78	7.28	6.84	6.43
25	14.09	12.78	11.65	10.67	9.82	9.08	8.42	7.84	7.33	6.87	6.46
26	14.38	13.00	11.83	10.81	9.93	9.16	8.49	7.90	7.37	6.91	6.49
27	14.64	13.21	11.99	10.94	10.03	9.24	8.55	7.94	7.41	6.94	6.51
28	14.90	13.41	12.14	11.05	10.12	9.31	8.60	7.98	7.44	6.96	6.53
29	15.14	13.59	12.28	11.16	10.20	9.37	8.65	8.02	7.47	6.98	6.55
30	15.37	13.76	12.41	11.26	10.27	9.43	8.69	8.06	7.50	7.00	6.57

* $\dfrac{1 - \left(\frac{1}{1+i}\right)^n}{i}$

Lorsqu'un projet apparaît non rentable au plan micro-économique, il faut toutefois se demander si le projet n'a pas un intérêt sur un autre plan.

La nécessité de bien gérer l'eau ne fait aucun doute pour l'agriculture actuelle. Il se peut qu'une intervention soit stratégique pour le maintien ou le développement de l'agriculture d'une localité. Un tel phénomène est difficilement quantifiable, mais doit être pris en considération. De la même façon, si l'intérêt de l'aménagement repose sur des changements majeurs dans les pratiques culturales (par exemple passer de la culture du foin à celle du maïs), la décision finale doit être prise en considérant le dynamisme local et le potentiel agricole du secteur.

Pour les impacts environnementaux, le projet doit être analysé avec l'aide des personnes-ressources compétentes (M.L.C.P. par exemple) relativement aux mesures de mitigation possibles pour chacune des options envisagées. Encore une fois, l'aspect stratégique des ressources environnementales locales doit être pris en compte.

En conclusion, pour analyser et finalement recommander ou rejeter une intervention, il faut envisager toutes les solutions, en établir tous les avantages, les inconvénients, et les coûts et évaluer chaque projet à partir de connaissances éclairées du milieu tant au point de vue agricole, social qu'environnemental.

2.3.3 Exemple de calcul:

(à la suite d'une analyse faite avec la figure 2.2)

S :	superficie totale souffrante	= 120 ha...(a)
Mav :	marge brute totale annuelle avant l'aménagement	= 30 000$..(b)
Map :	marge brute totale annuelle après l'aménagement	= 40 000$..(c)
B.N.:	bénéfice net annuel (c-b)	= 10 000$
i :	taux d'actualisation choisi	= 9%

n : Période d'amortissement (vie anticipée de l'aménagement) = 12 ans

C : Coût anticipé de l'aménagement = 60 000$

Il faut calculer maintenant les bénéfices totaux actualisés (B.T.A.) sur la période d'amortissement; c'est-à-dire additionner les bénéfices nets qui s'accumulent annuellement pendant les 12 ans de la vie anticipée du cours, et de les exprimer en termes de dollars d'aujourd'hui.

Par le tableau 2.3, pour une période de 12 ans à 9%:-

F.A. : Facteur d'actualisation = 7,16

B.T.A.: Bénéfices totaux actualisés = B.N. F.A.

= 10 000$ 7,16

= 71 600$

Ces bénéfices exprimés comme tels en dollars d'aujourd'hui peuvent être comparés au coût du projet, également en dollars d'aujourd'hui.

$$\text{Rapport} = \frac{\text{Bénéfices totaux actualisés}}{\text{Coût du projet}} = \frac{71\,600\$}{60\,000\$}$$

$$= 1{,}19$$

Un rapport supérieur à un (1) indique que l'investissement sera récupéré et que le projet est économiquement rentable.

Un rapport inférieur à un (1) indique que le projet coûte plus cher que les bénéfices anticipés, et pour continuer le projet, d'autres facteurs doivent être soulevés pour justifier l'investissement.

Un autre rapport qui peut être utile dans l'analyse est le coût par hectare amélioré:

$$\frac{\text{Coût du projet}}{\text{Superficie souffrante améliorée}} = \frac{60\ 000\$}{120} = 500\$/\text{ha}$$

Cette valeur peut être comparée à la valeur marchande des terres du secteur afin de juger si le niveau d'investissement est d'un ordre raisonnable.

CHAPITRE 3

ÉTUDE HYDROLOGIQUE

CHAPITRE 3

ÉTUDE HYDROLOGIQUE

		Page
3.1	Hydrologie	3-6
3.2	Paramètres utilisés dans les méthodes d'évaluation des débits de pointe	3-7
	3.2.1 Période de récurrence	3-7
	3.2.2 Hauteur de précipitation	3-9
	3.2.3 Intensité de précipitation	3-10
	3.2.4 Temps de concentration	3-11
	3.2.5 Coefficient de ruissellement	3-13
3.3	Évaluation des débits de pointe pour les petits bassins versants (superficie inférieure à 15 km^2)	3-17
	3.3.1 Méthode rationnelle	3-17
	3.3.2 Méthode de l'hydrogramme triangulaire	
	3.3.3 Méthode Fugère	3-19
3.4	Évaluation des débits de pointe pour les grands bassins versants (superficie supérieure à 15 km^2)	3-22
	3.4.1 Méthode de l'hydrogramme unitaire synthéthique	3-22
	3.4.2 Comparaison avec un bassin versant jaugé.	3-29
3.5	Débit d'étiage	3-30
3.6	Modification des hydrogrammes	3-32
3.7	Annexe 1 : Pluie maximale d'une durée de 6 heures	3-35
3.8	Annexe 2 : Exemples de calcul	3-45
	3.8.1 Exemple de calcul de débit de pointe d'un petit bassin versant	3-46
	3.8.2 Exemple de calcul de débit de pointe d'un grand bassin versant par la méthode de l'hydrogramme unitaire synthétique	3-56
3.9	Annexe 3 : Liste des paramètres utilisés dans le chapitre 3	3-65

LISTE DES FIGURES

		Page
3.1	Relation ruissellement/pluie pour les différents numéros de courbes	3-16
3.2	Débit spécifique (qs) en fonction du bassin versant ($m^3/s/km^2$)	3-20
3.3	Hydrogramme synthétique	3-26
3.4	Coefficient à appliquer à la valeur du débit de pointe lors de la sommation de trois hydrogrammes unitaires de deux heures	3-27
3.5	Coefficient à appliquer à la valeur du débit de pointe lors de la sommation de six hydrogrammes unitaires de deux heures	3-28
3.6	Évaluation des débits d'étiage	3-31
3.7	Modification des hydrogrammes	3-33
3.8	Pluie maximale probable pour une durée de 6 heures et un retour de 2 ans	3-36
3.9	Pluie maximale probable pour une durée de 6 heures et un retour de 5 ans	3-37
3.10	Pluie maximale probable pour une durée de 6 heures et un retour de 10 ans	3-38
3.11	Pluie maximale probable pour une durée de 6 heures et un retour de 25 ans	3-39
3.12	Pluie maximale probable pour une durée de 6 heures et un retour de 50 ans	3-40
3.13	Pluie maximale probable pour une durée de 6 heures et un retour de 100 ans	3-41
3.14	Facteur de conversion FC en fonction de la durée de la pluie T (min)	3-42

Page

3.15 Facteur de conversion FC en fonction de la durée de la pluie T (heures) 3-43

3.16 Bassin versant du cours d'eau Prévost 3-47

3.17 Caractéristiques du bassin versant du cours d'eau Prévost 3-50

3.18 Hydrogramme unitaire synthétique partie supérieure de la rivière des Anglais 3-60

3.19 Convolution des hydrogrammes unitaires synthétiques (2 à 24 heures) pour la partie supérieure de la rivière des Anglais 3-62

3.20 Hydrogrammes synthétiques résultant d'une pluie maximale probable de 12 heures pour différentes récurrences partie supérieure de la rivière des Anglais 3-63

LISTE DES TABLEAUX

		Page
3.1	Facteurs a, b, c pour la formule de Wischmeier	3-13
3.2	Numéro de courbe CN pour différentes combinaisons et utilisations du sol (S.C.S.)	3-15
3.3	Équations de Fugère spécifiques à chaque courbe	3-21
3.4	Coefficient de ruissellement pour le bassin du cours d'eau Prévost	3-52
3.5	Débits de pointe du cours d'eau Prévost	3-55
3.6	Calcul du numéro de courbe pondéré $\overline{CN}$ pour la partie supérieure du bassin versant de la rivière des Anglais	3-58

3 ÉTUDE HYDROLOGIQUE

3.1 HYDROLOGIE

L'hydrologie étudie les relations entre d'une part les précipitations et d'autre part la répartition et le mouvement de l'eau sur la terre.

Ce chapitre traite plus précisément des précipitations à l'origine des débits des cours d'eau. On y présente des méthodes permettant d'estimer l'ampleur des débits de pointe sur les bassins versants forestiers et agricoles.

Le ruissellement en surface est la principale source d'eau des cours d'eau et des rivières. L'évaluation des débits de crue permet de dimensionner les sections d'écoulement en fonction des surplus d'eau à évacuer. D'où l'importance de paramètres physiques tels la superficie du bassin versant, la pente, le couvert végétal et l'intensité de la précipitation dans la majorité des formules proposées.

L'évaluation des crues de printemps occasionnées par la fonte des neiges ou par des embâcles de glace a été omise en raison de l'objectif de valorisation du territoire agricole en saison de culture poursuivi par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

De même une méthode d'estimation des débits d'étiage a été ajoutée à la fin de cette section. On pourra évaluer la hauteur hydraulique à l'étiage en fonction de la géométrie de la section projetée et ce, à des fins de conservation de la faune aquatique.

Les diverses méthodes développées pour estimer les débits de crue doivent être employées en tenant compte de leurs limites de validité. (ex.: superficie des bassins versants).

Les méthodes rationnelle et de l'hydrogramme triangulaire sont utilisées pour les petits bassins versants de 15 km^2 ou moins. L'hydrogramme unitaire synthétique et la comparaison à un bassin jaugé s'emploient pour de grands bassins versants de 15 km^2 et plus. La méthode Fugère fournit des valeurs de débit moyen en saison de culture et peut être difficilement comparée aux autres méthodes qui établissent des débits de pointe.

En pratique, pour les petits bassins versants, on devrait vérifier ces calculs en utilisant plus d'une méthode et en pondérant les résultats par une observation ou une enquête sur le comportement du cours d'eau.

Pour les grands bassins versants, l'hydrogramme unitaire synthétique donne des résultats satisfaisants lorsqu'on ne dispose d'aucune donnée de jaugeage. Le jaugeage ou la comparaison à un bassin jaugé situé dans le même cours d'eau fournissent des données basées sur l'observation du comportement du cours d'eau.

Une attention spéciale doit être portée aux modifications possibles aux hydrogrammes de crue par des interventions au niveau du cours d'eau (phasage de crues).

3.2 PARAMÈTRES UTILISÉS DANS LES MÉTHODES D'ÉVALUATION DES DÉBITS DE POINTE

3.2.1 Période de récurrence

La période de récurrence est la réciproque de la probabilité que survienne un événement donné.

$$P = 1/Tr$$

P : probabilité

Tr : période de retour (année)

Ainsi une période de récurrence de 20 ans représente un risque de 0,05 ou 5%.

Le degré de protection à donner est en fonction du tableau suivant:

SITUATIONS	RÉCURRENCE RECOMMANDÉE
1) dommages mineurs, plaine inondable restreinte, cultures extensives (foin)	5 ans
2) Plaine inondable importante, cultures à hauts rendements, inondation de bâtiments de ferme	10 ans
3) Routes:	
- rurales	25 ans
- principales	50 ans
- urbaines	100 ans
- autoroutes	100 ans
- chemin de fer	100 ans

La période de récurrence peut être ajustée pour des tronçons homogènes du cours d'eau en fonction des contraintes du milieu et de la sécurité désirée.

Le degré de protection à donner aux propriétés riveraines, est établi en fonction des récurrences des débits de crue du cours d'eau. La section du canal peut être dimensionnée de façon à contenir une crue donnée sans débordement.

Le coût du projet est fonction de la protection choisie selon l'intensité et le risque de dommages causés par l'inondation.

3.2.2 Hauteur de précipitation

La hauteur des précipitations pour des durées et des périodes de récurrence donnée se retrouve dans la publication MP-51 du ministère de l'Environnement du Québec "Atlas des hauteurs, durées et fréquences des précipitations du Québec méridional" (Ferland, 1974). La section 3.7, annexe 1, présente les pluies maximales d'une durée de 6 heures pour des récurrences de 2 à 100 ans.

On considère, par hypothèse, qu'une pluie de période de récurrence donnée entraîne un débit de pointe de même récurrence.

La hauteur de précipitation peut être représentée par les paramètres suivants:

H : hauteur d'eau précipitée durant le temps T (mm)

Hc : hauteur d'eau correspondant à la pluie maximale probable pour une durée égale au temps de concentration Tc et pour une récurrence donnée (mm)

H_{DP} : hauteur d'eau correspondant à la pluie maximale probable pour une durée égale à DP et pour une récurrence donnée (mm)

H_6 : hauteur d'eau correspondant à la pluie maximale probable pour une durée de 6 heures et pour une récurrence donnée (mm)

H_{12} : hauteur d'eau correspondant à la pluie maximale probable pour une durée de 12 heures et pour une récurrence donnée (mm)

3.2.3 Intensité de précipitation

C'est le quotient de la hauteur de précipitation par la durée de la pluie.

$$I = \frac{H}{T}$$

I : intensité de précipitation (mm/h)
H : hauteur d'eau précipitée durant le temps T (mm)
T : durée de la pluie (heure)

Le calcul du débit de pointe dans un cours d'eau s'effectue à partir d'une durée de l'averse égale au temps de concentration du bassin versant.

3.2.4 Temps de concentration

Le temps de concentration est la période de cheminement d'une goutte d'eau entre le point le plus éloigné hydrauliquement et l'exutoire.

1) Formule de Kirpich

$$Tc = \frac{0{,}0195\ L^{0{,}77}}{S^{0{,}385}}$$

Tc : temps de concentration (min)
L : longueur maximale de parcours de l'eau dans le bassin (m)
S : pente entre le point le plus éloigné du bassin et l'exutoire (m/m)

2) Formule de Bransby - Williams

$$Tc = \frac{0{,}00095\ L}{S^{0{,}2}\ A^{0{,}1}}$$

Tc : temps de concentration (heure)
S : pente du bassin versant (%)
A : superficie du bassin (ha)
L : longueur de parcours de l'eau (m)

3) Formule de Mockus

$$Tc = \frac{L^{0,8}\ (R+1)^{1,67}}{2083\quad S^{0,5}}$$

Tc : temps de concentration (heure)

L : longueur maximale de parcours de l'eau dans le bassin versant (m)

S : pente du bassin versant (%)

R : différence maximale potentielle entre la précipitation et le ruissellement à partir du début de la précipitation

$$R = \left(\frac{1000}{\overline{CN}}\right) - 10$$

$\overline{CN}$: numéro de courbe pondéré ou potentiel de ruissellement moyen du bassin versant (voir section 3.2.5 sur le coefficient de ruissellement).

4) Validité d'application

Les méthodes d'estimation du temps de concentration s'appliquent parfois mal aux petits bassins versants agricoles. A la suite à d'observations aux champs effectuées dans l'est de l'Ontario (McNeely Engineering 1982, Coote 1983), il semble que les temps estimés pour des petits bassins versants agricoles (superficie $<$ 20 km^2) soient sous-évalués par un facteur variant de 2 à 4 fois par rapport aux temps observés. Les temps de concentration réels varient de 6 à 12 heures en général pour des bassins de superficie inférieure à 20 km^2 (McNeely Engineering, 1982).

3.2.5 Coefficient de ruissellement

Cette valeur représente le quotient de la lame d'eau qui ruisselle à la surface du sol par rapport à la lame d'eau totale accumulée lors de la précipitation. Il existe plusieurs façons d'évaluer le coefficient de ruissellement.

1) Formule de Wischmeier: $C = 1 - [a + b + c]$

C : coefficient de ruissellement
a : facteur de topographie
b : facteur de sol
c : facteur de couvert végétal

Le tableau suivant donne quelques valeurs des paramètres a, b et c.

TABLEAU 3.1

FACTEURS a,b,c POUR LA FORMULE DE WISCHMEIER

GENRE DE SURFACE	VALEURS DES FACTEURS a, b et c
Topographie: facteur a	
Terrain plat, pente moyenne de 0,2 à 0,6 (m/km)	0,30
Terrain vallonneux, pente moyenne de 2 à 4 (m/km)	0,20
Terrain montagneux, pente moyenne de 25 à 50 (m/km)	0,10
Sol: facteur b	
Argile compacte, imperméable	0,10
Mélange moyen d'argile et de loam	0,20
Loam sableux bien aéré	0,40
Couvert végétal: facteur c	
Terrains cultivés	0,10
Boisés	0,20

2) Méthode "Soil Conservation Service" modifiée

Cette méthode est basée sur l'utilisation du sol, la pente du terrain considéré, la condition hydrologique du sol au moment de la précipitation et les caractéristiques physiques du sol.

En se référant au tableau 3.2 et en fonction des paramètres décrits ci-dessus, on calcule un numéro de courbe pondéré ($\overline{CN}$). À la section 3.8 Annexe 2, tableau 3.4, on présente un exemple de calcul du numéro de courbe pondéré $\overline{CN}$. La figure 3.1 permet de déterminer la lame d'eau ruissellée (Ru) à partir de la hauteur de pluie tombée (Hc) et du numéro de courbe pondéré ($\overline{CN}$), ce qui nous donne le coefficient de ruissellement.

$$C = \frac{Ru}{Hc}$$

C : coefficient de ruissellement
Ru : ruissellement correspondant à la hauteur de la lame d'eau ruissellée (mm)
Hc : hauteur d'eau correspondant à la pluie maximale probable pour une durée égale au temps de concentration du bassin versant et pour une récurrence donnée (mm)

Cette méthode développée par le "Soil Conservation Service" a été adaptée aux conditions du Québec (Monfet, 1979).

TABLEAU 3.2

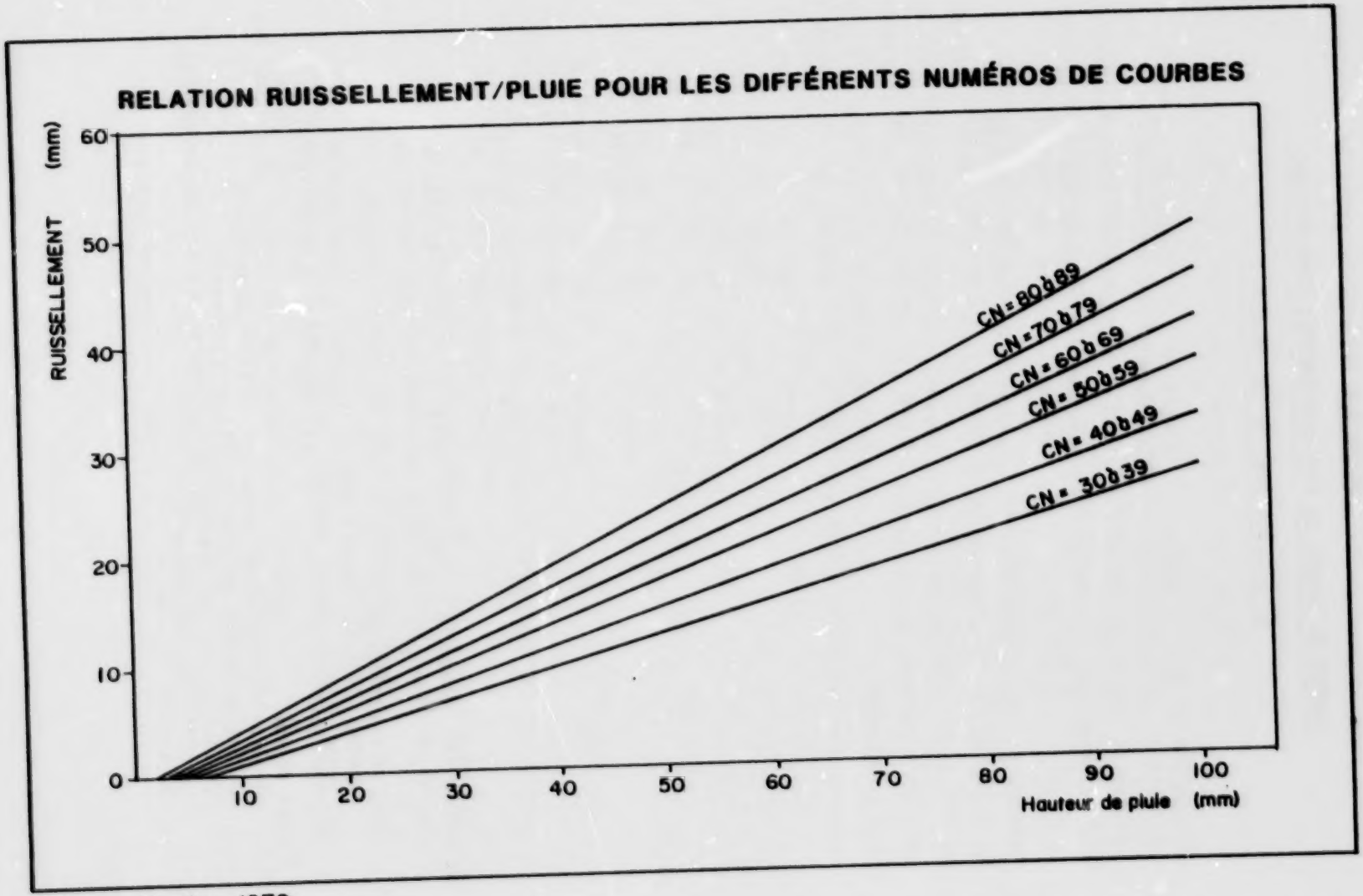
NUMÉRO DE COURBE CN POUR DIFFÉRENTES COMBINAISONS ET UTILISATIONS DU SOL (S.C.S.)

UTILISATION DU SOL	PENTE	CONDITION HYDROLOGIQUE*	CLASSE DE SOL**			
			A	B	C	D
Culture intensive	3%	pauvre	63	74	80	82
		bonne	60	70	78	81
	3-8%	pauvre	65	76	84	88
		bonne	63	75	83	87
	8%	pauvre	72	81	88	91
		bonne	67	78	85	89
Culture extensive	3%	pauvre	39	61	74	80
		bonne	25	40	70	78
	3-8%	pauvre	49	69	79	84
		bonne	39	61	74	80
	8%	pauvre	68	79	86	89
		bonne	49	69	79	84
Boisé	3%	pauvre	25	55	70	77
		bonne	22	53	65	74
	3-8%	pauvre	41	63	75	81
		bonne	25	55	70	77
	8%	pauvre	47	68	80	84
		bonne	41	63	75	81
Résidentielle, commerciale		dense	73	83	88	90
		peu dense	59	74	82	86

* Condition hydrologique:
pauvre (faible couvert végétal limitant l'interception)
bonne (bon couvert végétal, favorisant l'interception)

** Classe de sol:
A- Graviers et sables grossiers (Infiltration élevée)
B- Sables moyens et fins (Infiltration moyenne)
C- Sables fins mal drainés, sols limoneux et argiles perméables (Infiltration passable)
D- Argiles lourdes et sols minces (Infiltration faible)

Figure 3.1



Source: Monfet 1979

3.3 ÉVALUATION DES DÉBITS DE POINTE POUR LES PETITS BASSINS VERSANTS (SUPERFICIE INFÉRIEURE À 15 km^2)

3.3.1 Méthode rationnelle

Cette méthode s'applique pour des petits bassins versants homogènes soumis à une précipitation uniforme. Elle fut développée pour le drainage urbain et est employée couramment par le ministère des Transports du Québec pour le dimensionnement des ponceaux de route.

Elle est facile à appliquer mais en pratique tend à surévaluer les débits de pointe en raison de la non-homogénéité de la précipitation, de subtiles variations du coefficient de ruissellement à l'intérieur d'un même bassin versant, ainsi que de l'emmagasinement d'eau par les dépressions sur le terrain.

L'équation se présente sous la forme suivante:

$$Qp = CIA / 360$$

Qp : débit de pointe (m^3/s)
C : coefficient de ruissellement
I : intensité de la précipitation (mm/h)*
A : superficie du bassin versant (ha)

* L'intensité de la précipitation est le quotient du rapport Hc sur Tc (temps de concentration du bassin versant en heure).

3.3.2 Méthode de l'hydrogramme triangulaire

Cette méthode a été développée par le "Soil Conservation Service" et a été vérifiée et adaptée aux conditions du Québec (Desforges et Hoang, 1977).

Elle fait intervenir des paramètres physiques du terrain ainsi que les caractéristiques de la pluviométrie.

On obtient par cette méthode un débit de pointe maximal instantané. L'équation prend la forme suivante:

$$Qp = \frac{A \quad C \quad Hc}{57\ (5{,}28\ \ S)^{-0{,}43}\ \ Pf^{0{,}27}}$$

Qp : débit de pointe (m^3/s)

A : superficie du bassin versant (km^2)

C : coefficient de ruissellement

Hc : hauteur d'eau correspondant à la pluie maximale probable pour une durée égale au temps de concentration du bassin versant et pour une récurrence donnée (mm)

S : pente moyenne (85-10) du bassin versant. Cette pente est calculée entre les points qui se trouvent à 85% et 10% de distance à partir du point le plus éloigné de l'embouchure du cours d'eau ($^m/_{km}$)

Pf : pourcentage de couvert forestier (%)
(pour 90% de couvert forestier, on utilise la valeur entière 90 et non 0,90).

Le pourcentage de couvert forestier est estimé par interprétation de photos aériennes récentes et la pente moyenne (85-10) du bassin versant est obtenue par le relevé topographique sur le cours d'eau principal ou par calcul à partir d'une carte topométrique.

3.3.3 Méthode Fugère

Équation générale:

$$Qs = F\ A^{5/6} + K$$

$$F = 23{,}26\ S^{0{,}03} \qquad K = 155\ S^{0{,}25} - 38$$

Qs : débit selon la méthode Fugère (pi^3/s) *
F : variable de pente
S : pente du terrain (pi/pi)*
A : superficie du bassin versant (mi^2) *
K : variable de pente

Cette méthode empirique est une adaptation des équations du "Soil Conservation Service" pour le Mississipi aux conditions du Québec.

On retrouve ces équations sous la forme de courbes de ruissellement ajustées selon la topographie du terrain, la superficie du bassin versant et l'efficacité du drainage désiré. La figure 3.2 présente les courbes adaptées au système métrique. Elle permet de déterminer le débit spécifique qui, multiplié par la superficie du bassin versant, donne le débit pour un bon drainage agricole. Le tableau 3.3 présente les équations spécifiques à chaque courbe.

* N.B.: Cette équation a été développée en utilisant les unités du système anglais (pi, mille, pi^2, pi^3, etc.)

Figure 3.2

DÉBIT SPÉCIFIQUE (q_s) EN FONCTION DU BASSIN VERSANT ($m^3/s/km^2$)

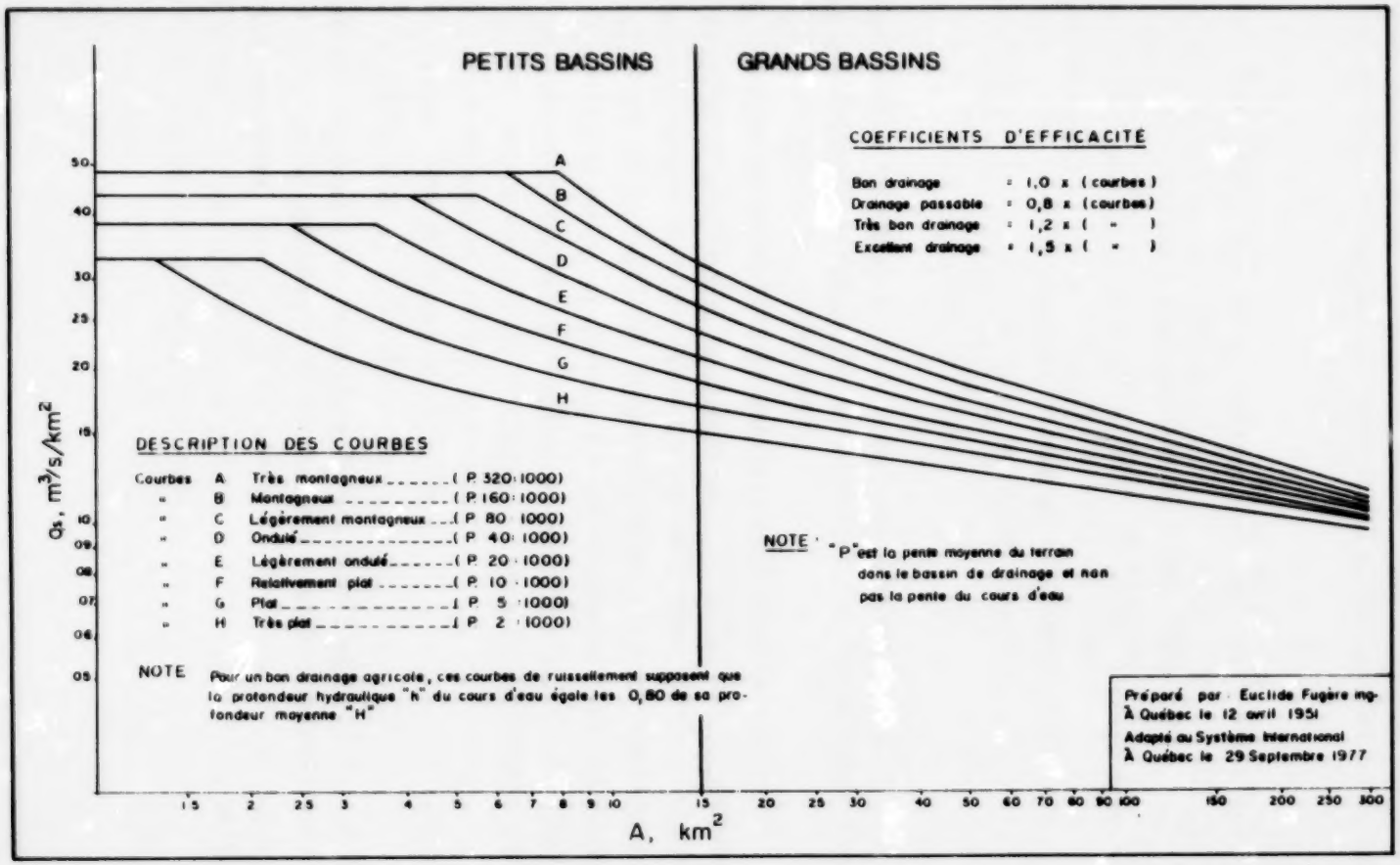


TABLEAU 3.3

ÉQUATIONS DE FUGÈRE

SPÉCIFIQUES À CHAQUE COURBE

Topographie du terrain	Pente moyenne du terrain	Équations du débit (Qs)	Courbe (Fugère)
MONTAGNEUX	32%	$22,48\ A^{0,83} + 78,58$	A
	16%	$22,02\ A^{0,83} + 60,03$	B
	8%	$21,56\ A^{0,83} + 44,43$	C
ONDULÉ	4%	$21,12\ A^{0,83} + 31,32$	D
	2%	$20,68\ A^{0,83} + 20,29$	E
PLAT	1%	$20,26\ A^{0,83} + 11,02$	F
	0,5%	$19,84\ A^{0,83} + 3,22$	G
	0,2%	$18,92\ A^{0,83}$	H

Qs : débit selon la méthode de Fugère (pi^3/s) *

A : superficie du bassin versant (mi^2)

* Les équations ont été développées en utilisant les unités du système anglais.

3.4 ÉVALUATION DES DÉBITS DE POINTE POUR LES GRANDS BASSINS VERSANTS (SUPERFICIE SUPÉRIEURE À 15 km^2)

3.4.1 Méthode de l'hydrogramme unitaire synthétique

Cette méthode permet de prédire le débit de pointe pour une période de récurrence choisie et de simuler le comportement du cours d'eau en crue.

Cette méthode est basée sur un ruissellement unitaire de 25.4 mm provoqué par une pluie d'une durée de 2 heures. Elle a été validée au Québec par le ministère de l'Environnement pour une gamme de bassins versants variant de 15 à 2 010 km^2 (Monfet, 1981).

Les paramètres requis pour utiliser cette méthode sont:

A : superficie du bassin versant (km^2)

L : longueur maximale de parcours de l'eau dans le bassin versant (km)

S : pente moyenne (85-10) du bassin versant (m/km)

P_f : pourcentage de couvert forestier (%) (pour 95% de couvert forestier on utilise la valeur entière 95 et non 0,95)

C : coefficient de ruissellement

H_{DP} : hauteur d'eau correspondant à la pluie maximale probable pour une durée égale à DP et une récurrence donnée (mm)

DP : durée de précipitation d'une pluie maximale probable de récurrence donnée (heure)

Les équations permettant de construire l'hydrogramme unitaire synthétique sont:

1) Débit de pointe d'une pluie d'une durée de 2 heures (m^3/s)

$$Qp\ (2\ heures) = 1{,}54\ A^{0{,}744}$$

A : superficie du bassin versant (km^2)

2) Temps de base (h)

$$Tb = 39{,}6 + 0{,}463\ L$$

L : longueur du canal principal (km)

3) W_{50}, W_{75} (h)

Temps où le débit dépasse 50% ou 75% du débit de pointe (heure)

$$W_{50} = 6{,}43 + 0{,}304\ L$$

$$W_{75} = 2{,}94 + 0{,}185\ L$$

L : longueur du canal principal (km)

4) Hauteur d'eau ruisselée (mm)

$$Rs = \frac{3{,}6[(0{,}25\ W_{75})+(0{,}375\ W_{50})+0{,}25\ Tb)]\ Qp(2\ heures)}{A}$$

Il faut se rappeler que cette méthode de l'hydrogramme unitaire synthétique est calculée sur la base de 25,4 mm d'eau ruisselée. Lors du premier calcul de W_{50}, W_{75} et Tb, les équations introduisent une légère distorsion, de sorte que la valeur de Rs calculée par la dernière formule peut être différente de 25,4 mm.

Il faut alors corriger les valeurs de W_{50}, W_{75} et Tb en multipliant chacune par la valeur de 25,4/Rs pour déterminer les valeurs exactes des paramètres de temps qui serviront à construire l'hydrogramme unitaire synthétique.

5) Temps de montée (h)

$$Tm = 7{,}50\ e^{(0{,}0073\ L\ -\ 0{,}042S\ +\ 0{,}005\ P_f)}$$

L, S et P_f sont définis à la page 3-22.

6) Construction de l'hydrogramme

Pour tracer l'hydrogramme, il s'agit de porter le temps en abscisse et le débit en ordonnée.

On utilise le débit de pointe Qp, le temps de montée Tm, le temps de base corrigé Tbc et le W_{50c} et le W_{75c} corrigés.

Afin de déterminer l'abscisse des valeurs de W_{50c} et W_{75c} sur l'hydrogramme, on utilise les relations suivantes:

$$X_{50} = 0{,}50\ (Tm) + W_{50c}$$
$$X_{75} = 0{,}75\ (Tm) + W_{75c}$$

La figure 3.3 illustre la construction de l'hydrogramme unitaire synthétique.

On peut traiter la majorité des cas à partir d'une pluie maximale probable de 6 heures (DP=12) ou de 12 heures (DP=6). Il s'agit alors d'effectuer une sommation graphique de trois ou de six hydrogrammes décalés de 2 heures chacun. On additionne les ordonnées afin d'obtenir l'hydrogramme cumulatif résultant.

Chaque valeur cumulative doit être corrigée par le facteur suivant:

Formule générale : $\frac{H_{DP}\ C}{25,4\ NH}$

NH : nombre d'hydrogrammes unitaires synthétiques d'une durée de 2 heures

Le produit H_{DP} fois C correspond à la hauteur d'eau réelle ruisselée sur le bassin versant étudié.

Pour déterminer le débit correspondant à la hauteur de pluie ruisselée selon la durée de 6 heures et la récurrence choisie, on utilise le facteur H_6 C / 76,2. Le terme 76,2 provient du produit de trois hydrogrammes unitaires synthétiques de 25,4 mm chacun. De la même façon, pour une pluie d'une durée de 12 heures, on utilise le facteur H_{12} C / 152,4.

Les courbes des figures 3.4 et 3.5 servent à déterminer les coefficients F_6 et F_{12} à appliquer à la valeur du débit de pointe Qp (2 heures) obtenu par l'équation 1) page 3-23. Les débits de pointe Qp pour des pluies de durée de 6 ou 12 heures résultant de la sommation de trois ou de six hydrogrammes unitaires synthétiques de 2 heures se calculent comme suit:

$$Qp\ (6\ heures) = F_6\ Qp\ (2\ heures) \qquad H_6\ C\ /\ 76,2$$

$$Qp\ (12\ heures) = F_{12}\ Qp\ (2\ heures) \qquad H_{12}\ C\ /\ 152,4$$

On détermine les valeurs des coefficients F_6 et F_{12} en fonction de la superficie du bassin versant étudié sur les courbes des figures 3.4 et 3.5.

Figure 3.3

HYDROGRAMME SYNTHÉTIQUE

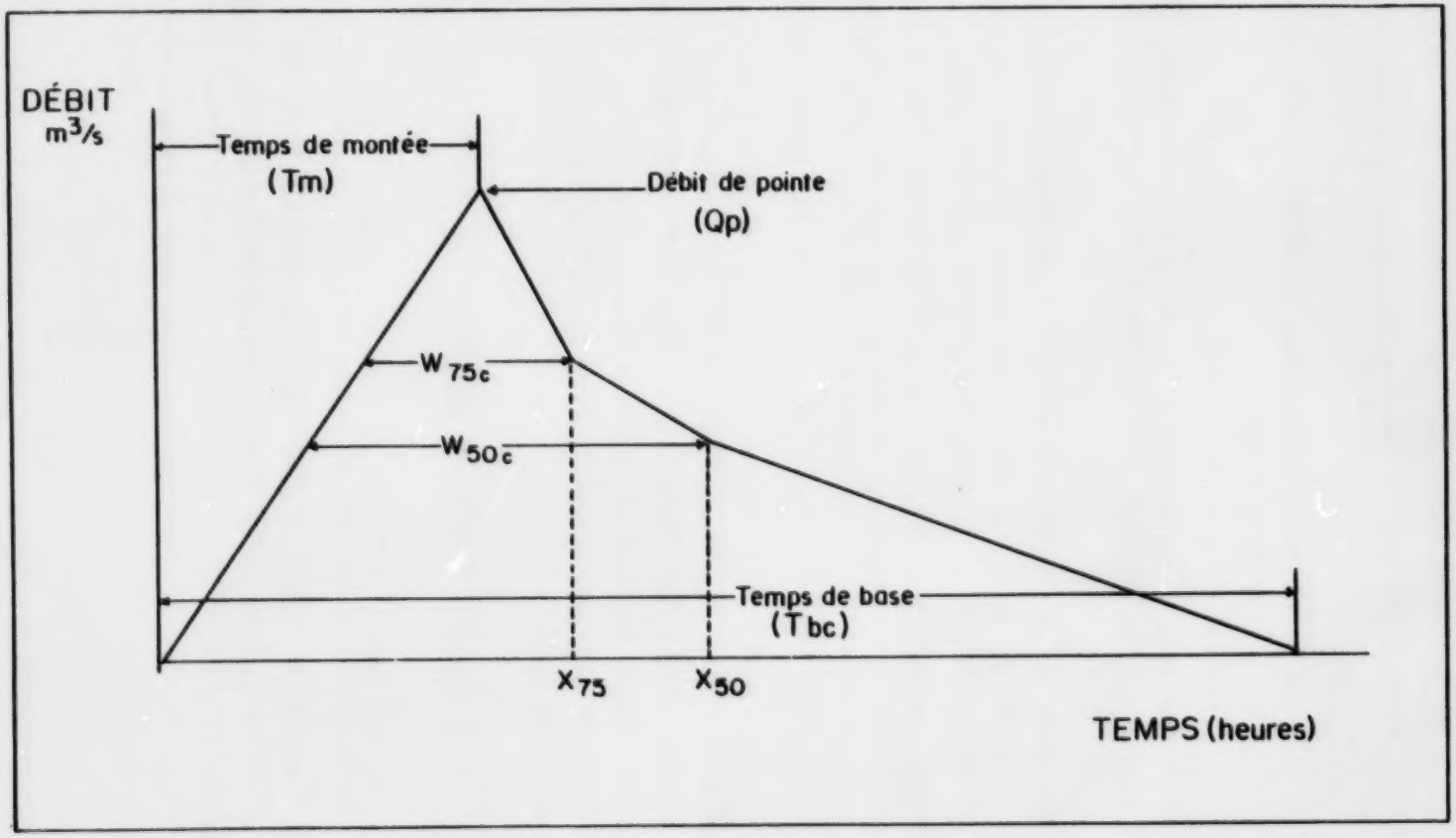
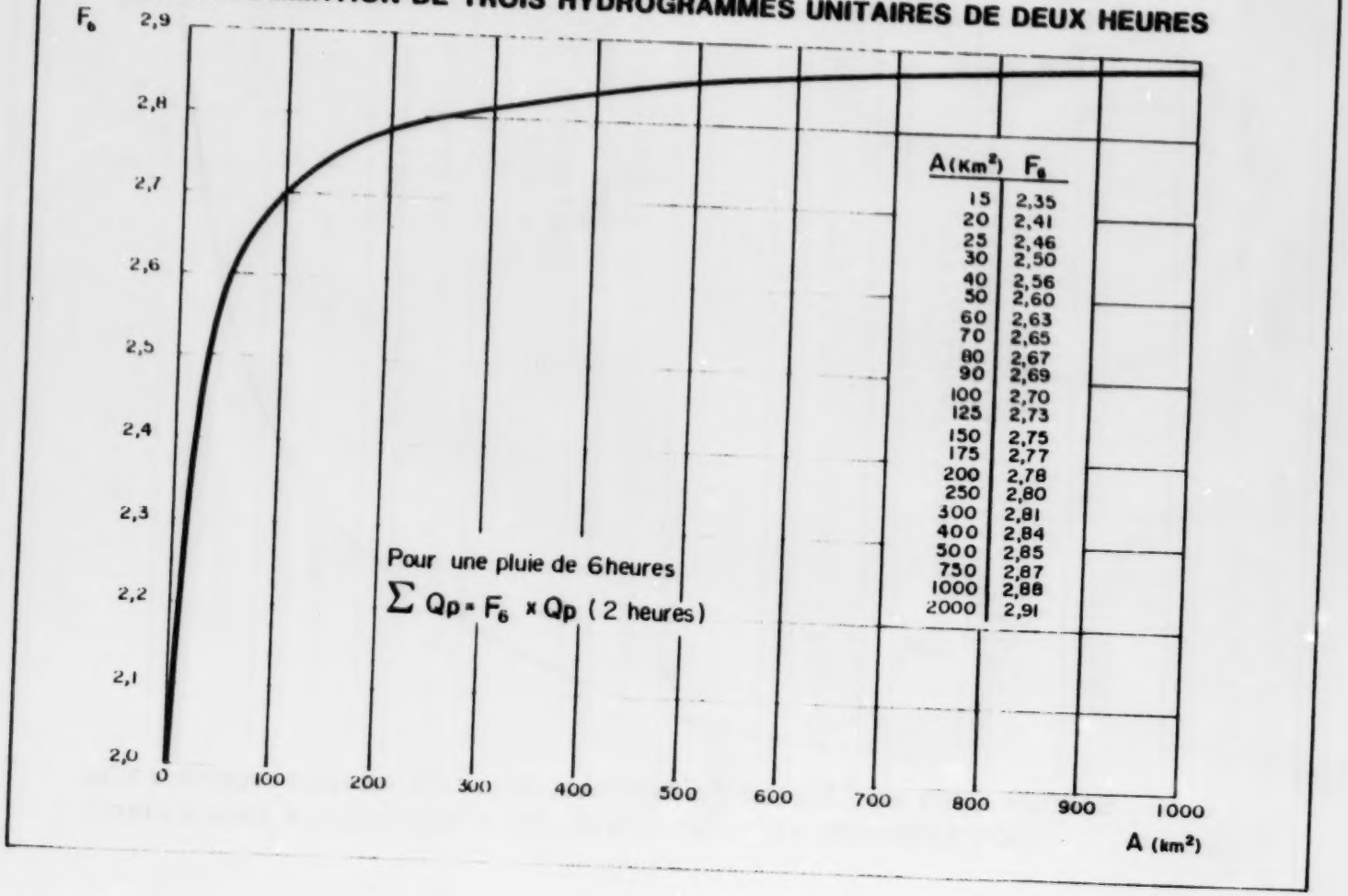


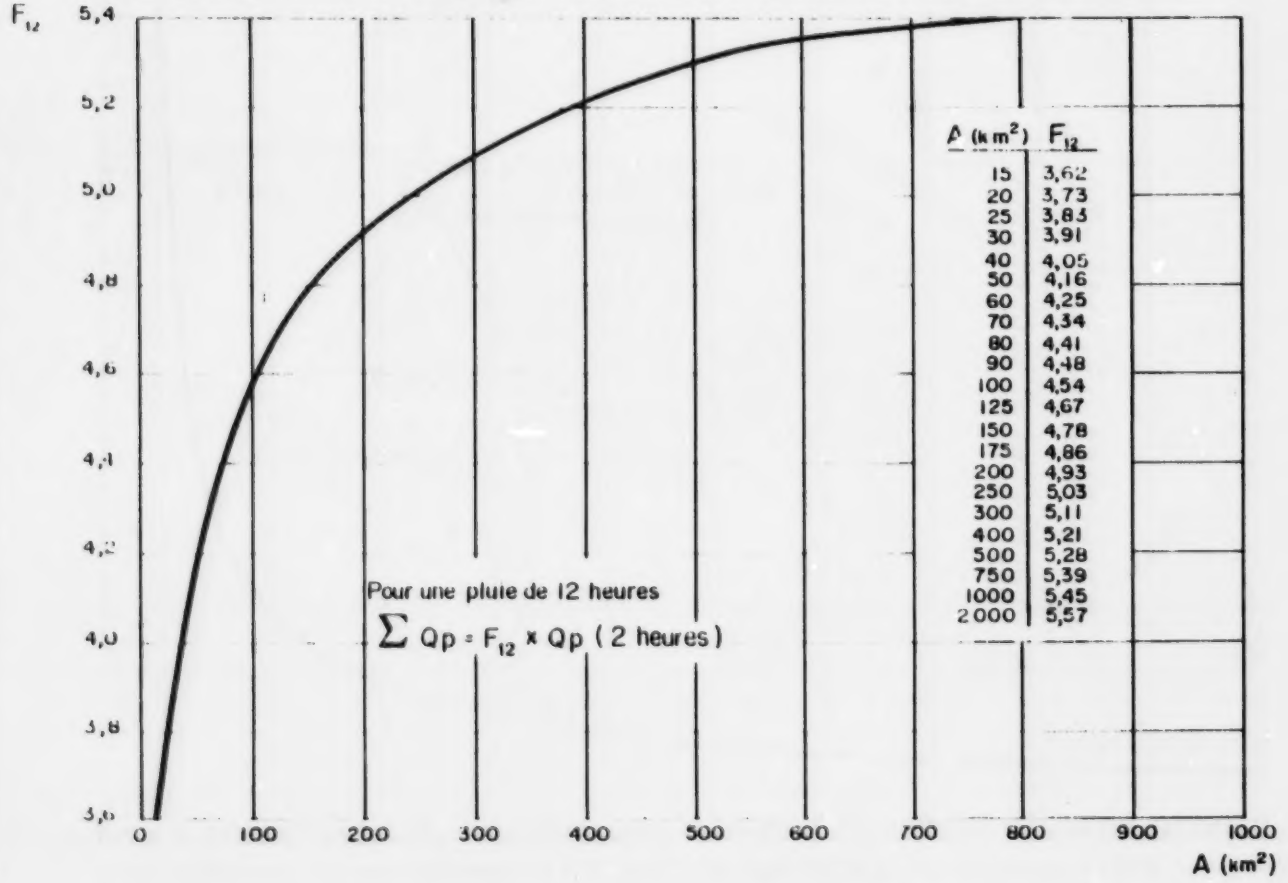
Figure 3.4

COEFFICIENT À APPLIQUER À LA VALEUR DU DÉBIT DE POINTE LORS DE LA SOMMATION DE TROIS HYDROGRAMMES UNITAIRES DE DEUX HEURES



A (Km²)	F_6
15	2,35
20	2,41
25	2,46
30	2,50
40	2,56
50	2,60
60	2,63
70	2,65
80	2,67
90	2,69
100	2,70
125	2,73
150	2,75
175	2,77
200	2,78
250	2,80
300	2,81
400	2,84
500	2,85
750	2,87
1000	2,88
2000	2,91

COEFFICIENT À APPLIQUER À LA VALEUR DU DÉBIT DE POINTE LORS DE LA SOMMATION DE SIX HYDROGRAMMES UNITAIRES DE DEUX HEURES



A (km²)	F_{12}
15	3,62
20	3,73
25	3,83
30	3,91
40	4,05
50	4,16
60	4,25
70	4,34
80	4,41
90	4,48
100	4,54
125	4,67
150	4,78
175	4,86
200	4,93
250	5,03
300	5,11
400	5,21
500	5,28
750	5,39
1000	5,45
2000	5,57

3.4.2 Comparaison avec un bassin versant jaugé

Sur un site non jaugé, mais à courte distance d'une station de jaugeage située sur le même cours d'eau, la formule suivante est suggérée:

$$Q_r = Q_j \left[\frac{A}{A_j} \right]^n \qquad \text{(Hoang, 1977)}$$

Q_r : débit recherché au site non jaugé (m^3/s)
Q_j : débit à la station de jaugeage (m^3/s)
A : superficie du bassin versant non jaugé (km^2)
A_j : superficie du bassin versant à la station de jaugeage (km^2)
n : coefficient variant selon le degré de similitude entre les deux bassins versants comparés

Le coefficient n est égal à 0,9 lorsque $0,5 < A/A_j < 2$, lorsque les bassins versants ont des formes semblables et qu'ils sont à proximité, et lorsqu'il n'y a pas de facteurs modifiant notablement le régime hydraulique (présence d'un barrage-réservoir par exemple) entre les deux points de référence.

Lorsque la similarité physique entre les deux bassins s'amoindrit, (forme dissemblable, rapport A/Aj plus éloigné), la valeur du coefficient n diminue jusqu'à des valeurs situées entre 0,60 et 0,75.

Le ministère de l'Environnement du Québec possède des relevés de débits pour certains cours d'eau de grande envergure qu'il peut fournir sur demande.

3.5 DÉBIT D'ÉTIAGE

Ces renseignements sur les débits d'étiage sont utiles pour les cours d'eau présentant un intérêt pour la faune aquatique.

Les formules régionales se retrouvent dans la figure 3.6, à la page suivante. Ces formules ont été développées à partir d'études sur des bassins versants du Québec d'une superficie de 150 km^2 et plus (Hoang et Tremblay, 1976).

Qe : débit moyen d'étiage de 30 jours consécutifs, de fréquence une année sur deux (litre/seconde)

A : superficie du bassin versant (km^2)

L_c : longueur caractéristique, correspondant à la distance entre le point du cours d'eau le plus proche du centre de gravité du bassin versant et l'exutoire, (km)

S : pente du bassin versant en % (m/100m) calculée comme suit:

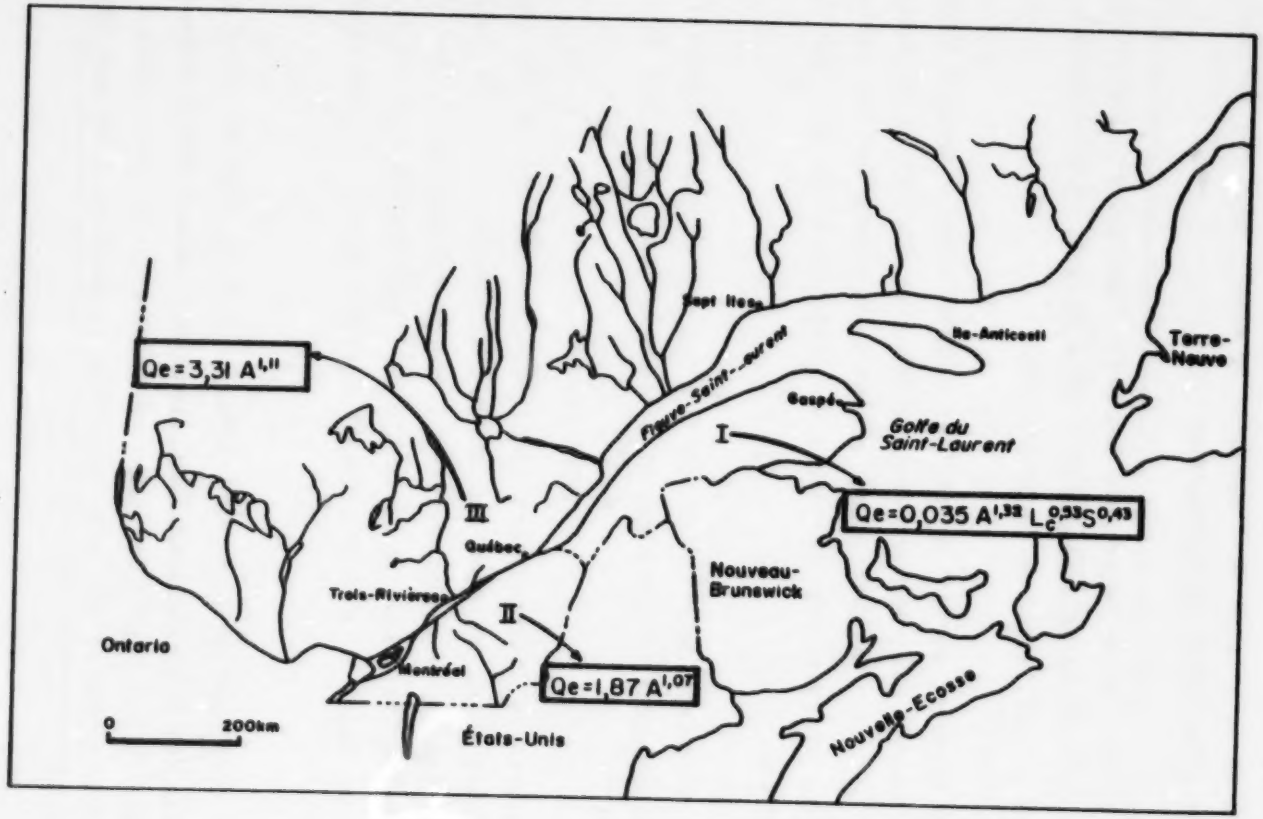
$$S = 2 \frac{B}{L}$$

B : altitude moyenne du centre de gravité du bassin versant moins l'altitude au point le plus bas (m)

L : longueur du cours d'eau principal (km)

Figure 3.6

ÉVALUATION DES DÉBITS D'ÉTIAGE



Source: Hoang et Tremblay, 1976

3.6 MODIFICATION DES HYDROGRAMMES

Une intervention sur un cours d'eau peut modifier son comportement et son hydrogramme de crue.

Le déboisement massif, le redressement de tous les méandres, l'accélération de la vitesse de l'eau dans le canal, tous ces facteurs peuvent modifier notablement un hydrogramme.

Un couvert boisé intercepte les précipitations et ralentit considérablement la vitesse de l'eau à la surface du sol. Une coupe à blanc augmente le ruissellement de façon marquée.

Les méandres servent à dissiper naturellement l'énergie cinétique de l'écoulement. Tout redressement de méandres diminue la longueur d'écoulement et, par le fait même, accentue la pente du tronçon redressé. L'énergie non dissipée va tendre à éroder et à déstabiliser le lit du cours d'eau.

Le nettoyage du lit d'un cours d'eau entraîne une augmentation de la vitesse d'évacuation de l'eau et diminue le temps de séjour de l'eau dans le canal.

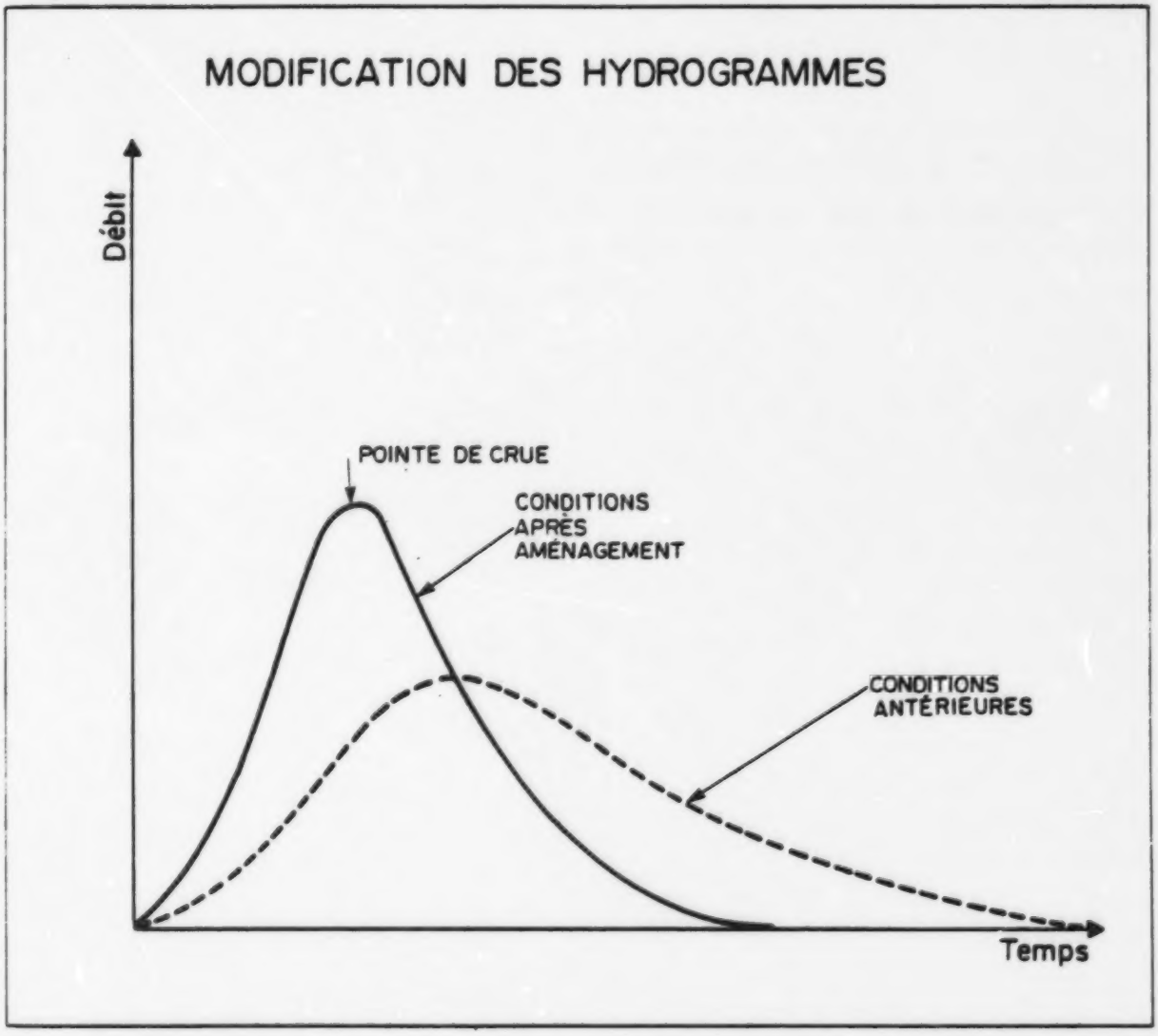
Toutes ces interventions combinées peuvent modifier le comportement d'un cours d'eau, de même que son hydrogramme de crue. De façon générale, on diminue le temps pris par l'eau pour s'évacuer, c'est dire qu'on va accentuer la valeur de la pointe de l'hydrogramme tout en réduisant le temps de base. Le cours d'eau démontre alors un comportement plus brutal.

Au confluent de deux cours d'eau, l'onde de crue du cours d'eau modifiée par des interventions, peut devenir en phase avec l'onde de crue de l'émissaire qui reçoit ses eaux. À ce moment, les deux ondes s'additionnent pour produire une onde amplifiée (sommation graphique des deux hydrogrammes).

Les pointes de crue seront donc accentuées dans l'émissaire. Un refoulement est possible si la capacité d'évacuation de l'émissaire est insuffisante.

En cas de doute, il est important d'effectuer une étude du bassin dans son ensemble.

Figure 3.7

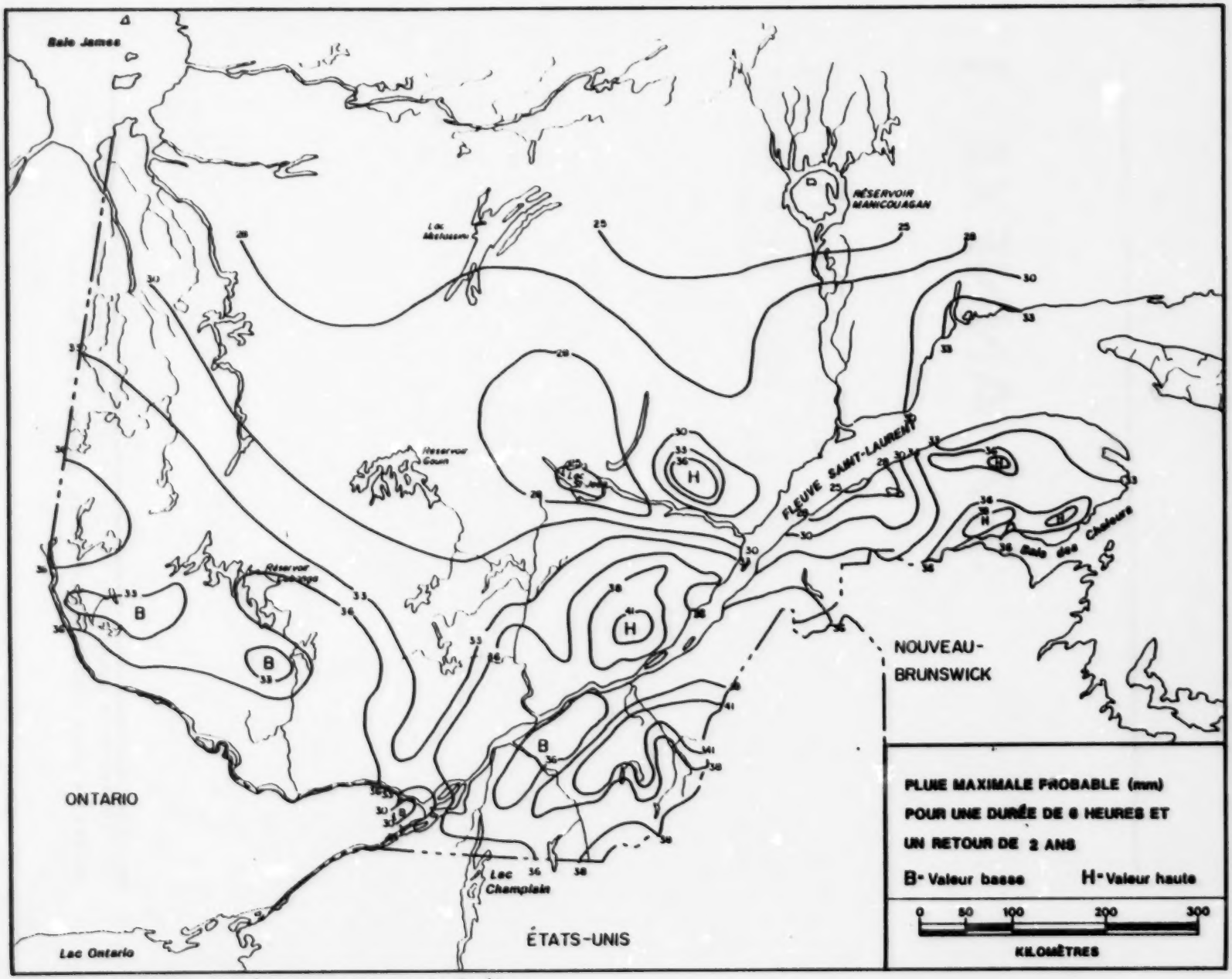


3.7 ANNEXE 1

PLUIE MAXIMALE D'UNE DURÉE DE 6 HEURES

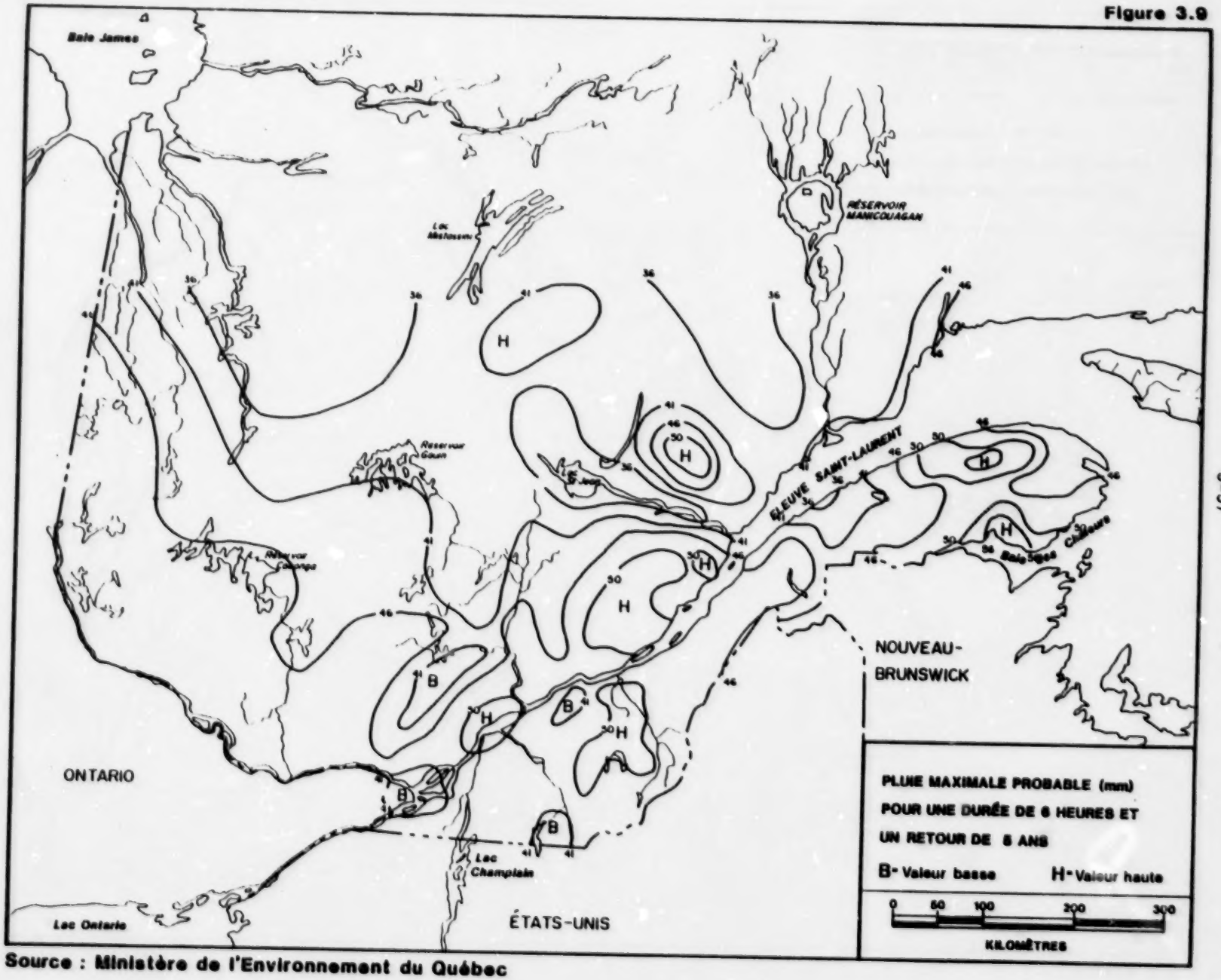
N.B. Consultez la publication MP-51 d'Environnement Québec pour des durées de pluie s'échelonnant de 30 minutes à 48 heures.

Figure 3.8



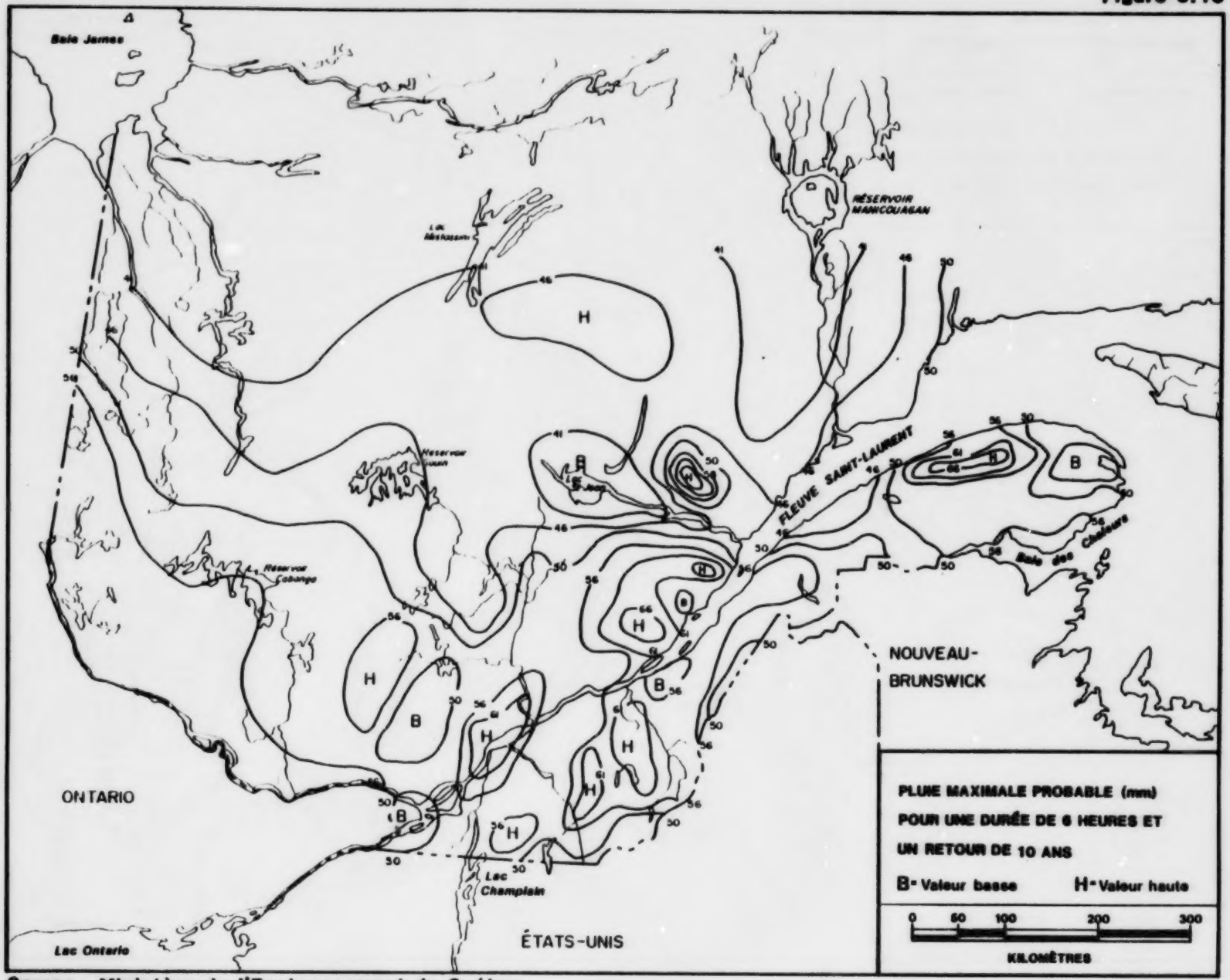
Source : Ministère de l'Environnement du Québec

Figure 3.9



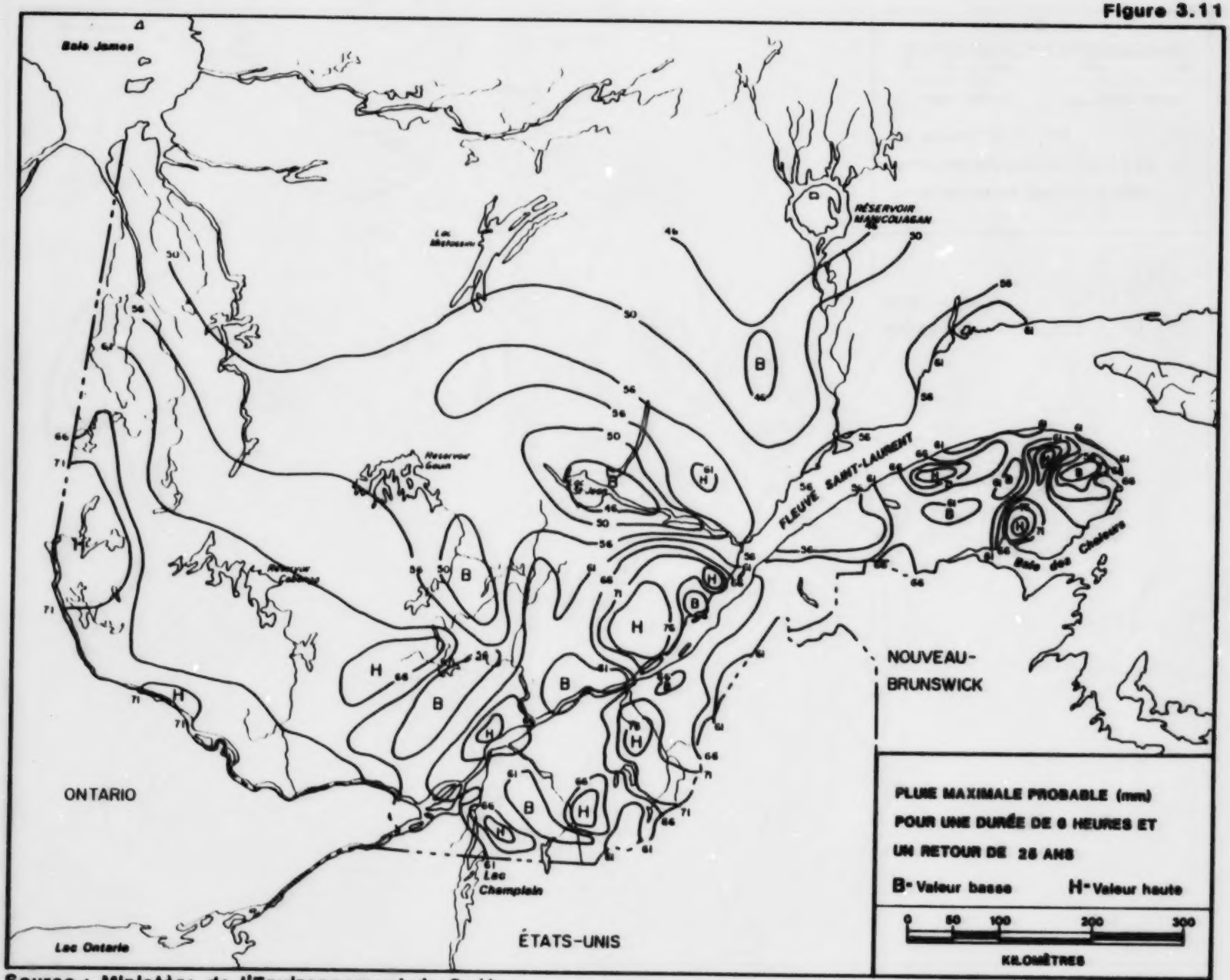
Source : Ministère de l'Environnement du Québec

Figure 3.10



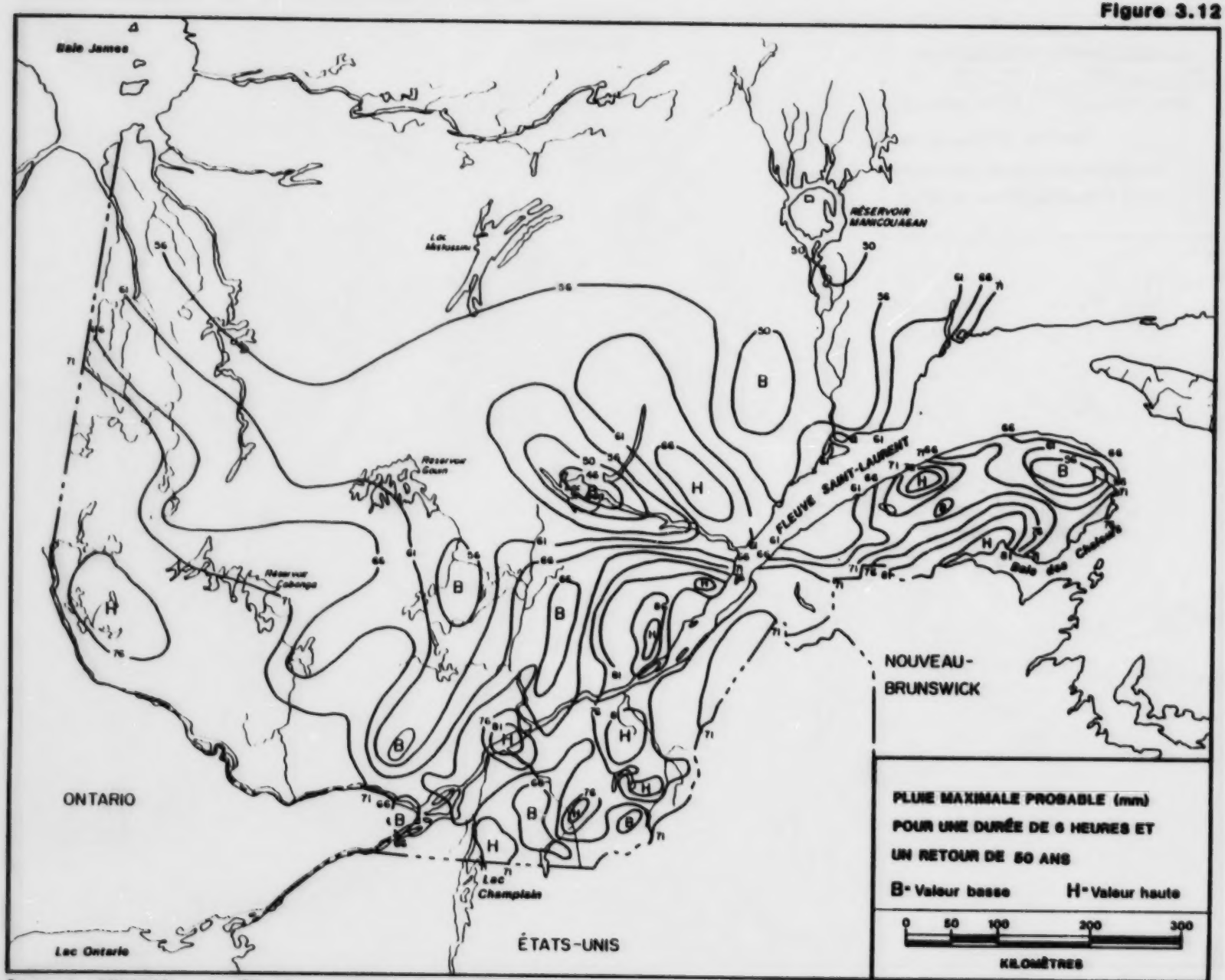
Source : Ministère de l'Environnement du Québec

Figure 3.11

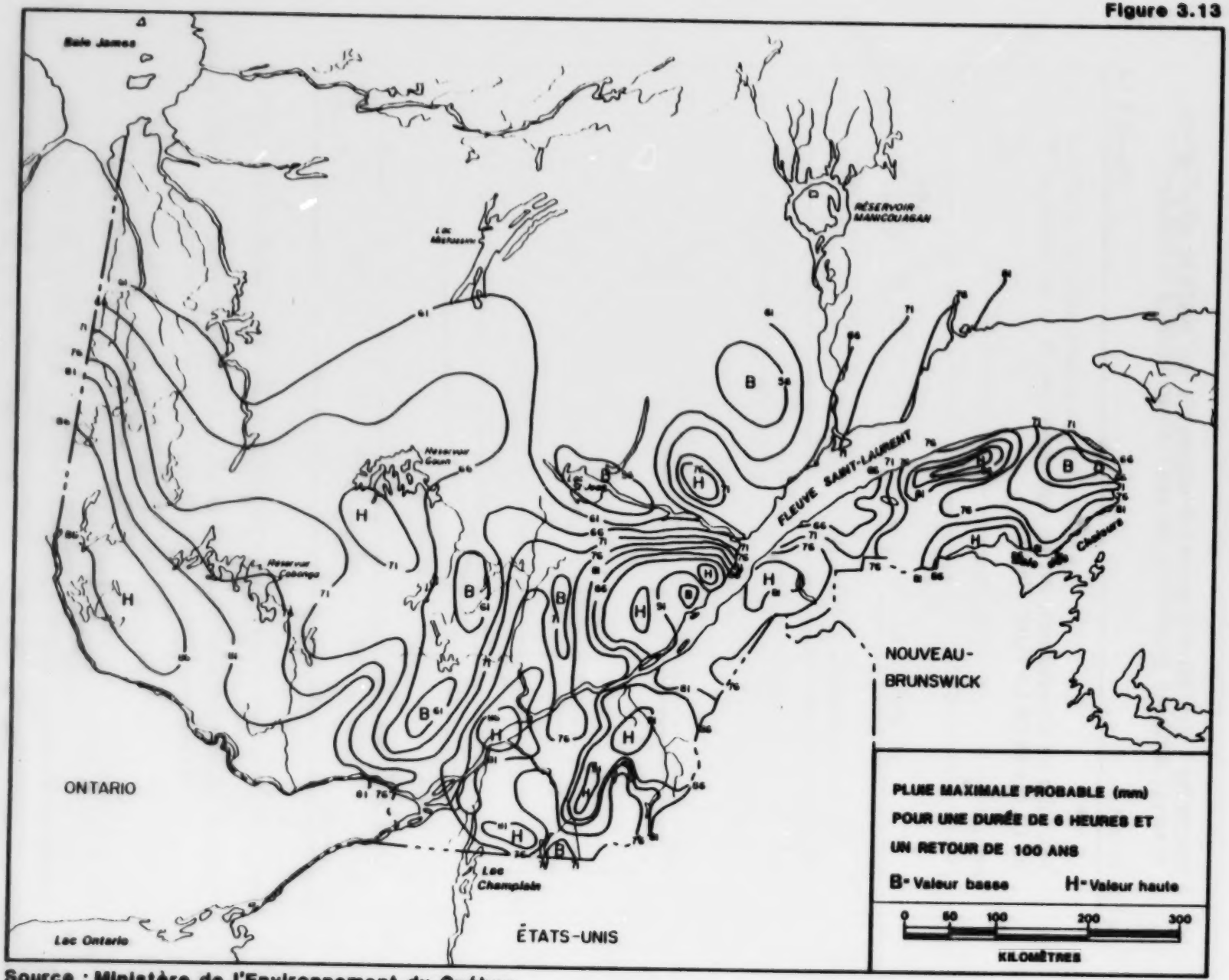


Source : Ministère de l'Environnement du Québec

Figure 3.12



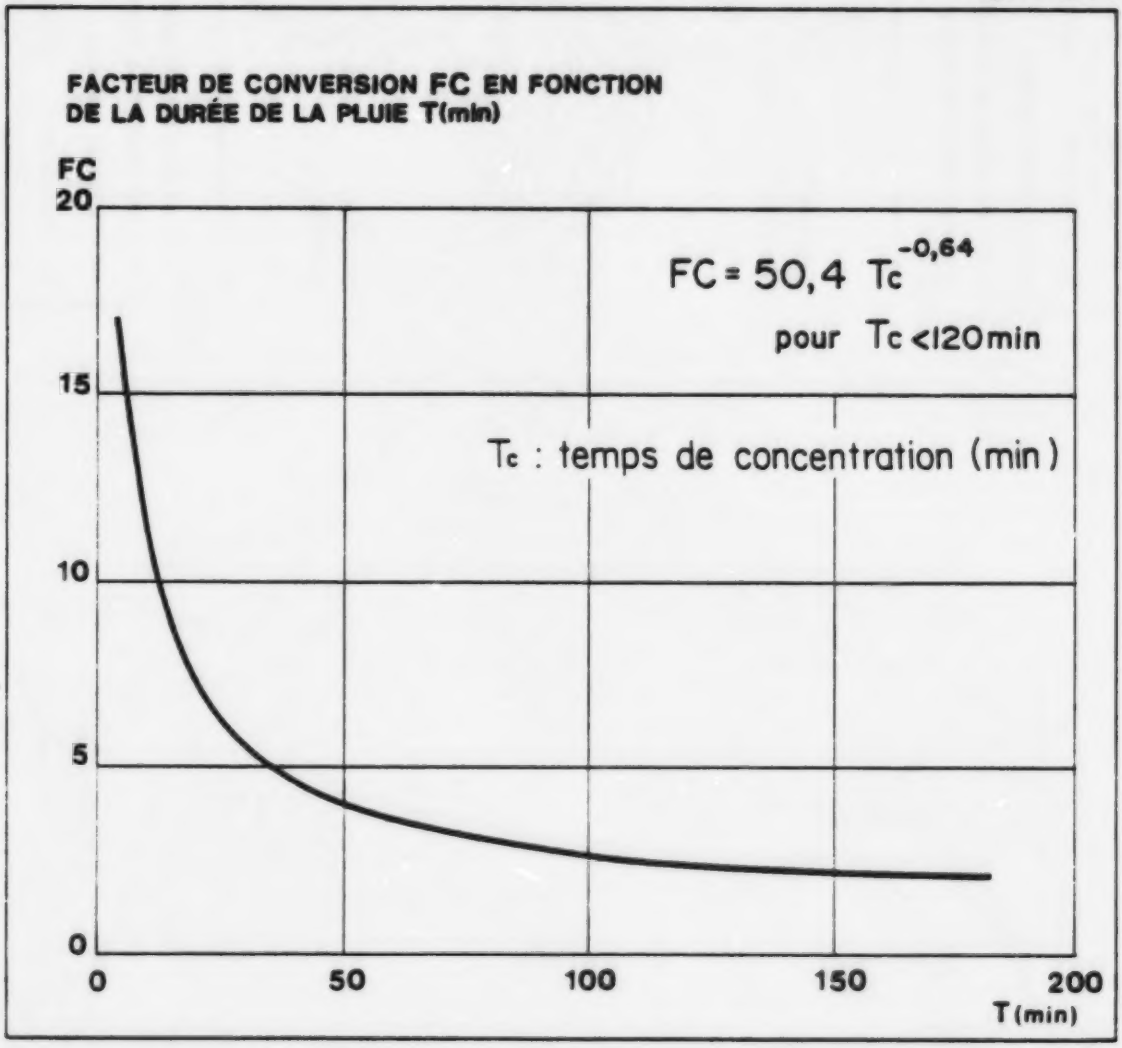
Source : Ministère de l'Environnement du Québec



Source : Ministère de l'Environnement du Québec

- CALCUL DE L'INTENSITÉ D'UNE PLUIE MAXIMALE D'UNE DURÉE DE MOINS DE 120 MINUTES, À PARTIR D'UNE PLUIE MAXIMALE D'UNE DURÉE DE SIX HEURES.

Figure 3.14



NOTE: POUR PLUS DE PRÉCISION, RÉFÉREZ-VOUS À L'ATLAS MP-51, QUÉBEC 1974

EXEMPLE: quelle est l'intensité d'une pluie d'une récurrence de 10 ans et d'une durée de 60 minutes $I_{(10,60)}$ pour la ville de Québec?

Figure 3.10 $I_{(10,6 \text{ heures})} = 62 \text{ mm/6 heures} = 10,33 \text{ mm/h} = I_{(10,6)}$

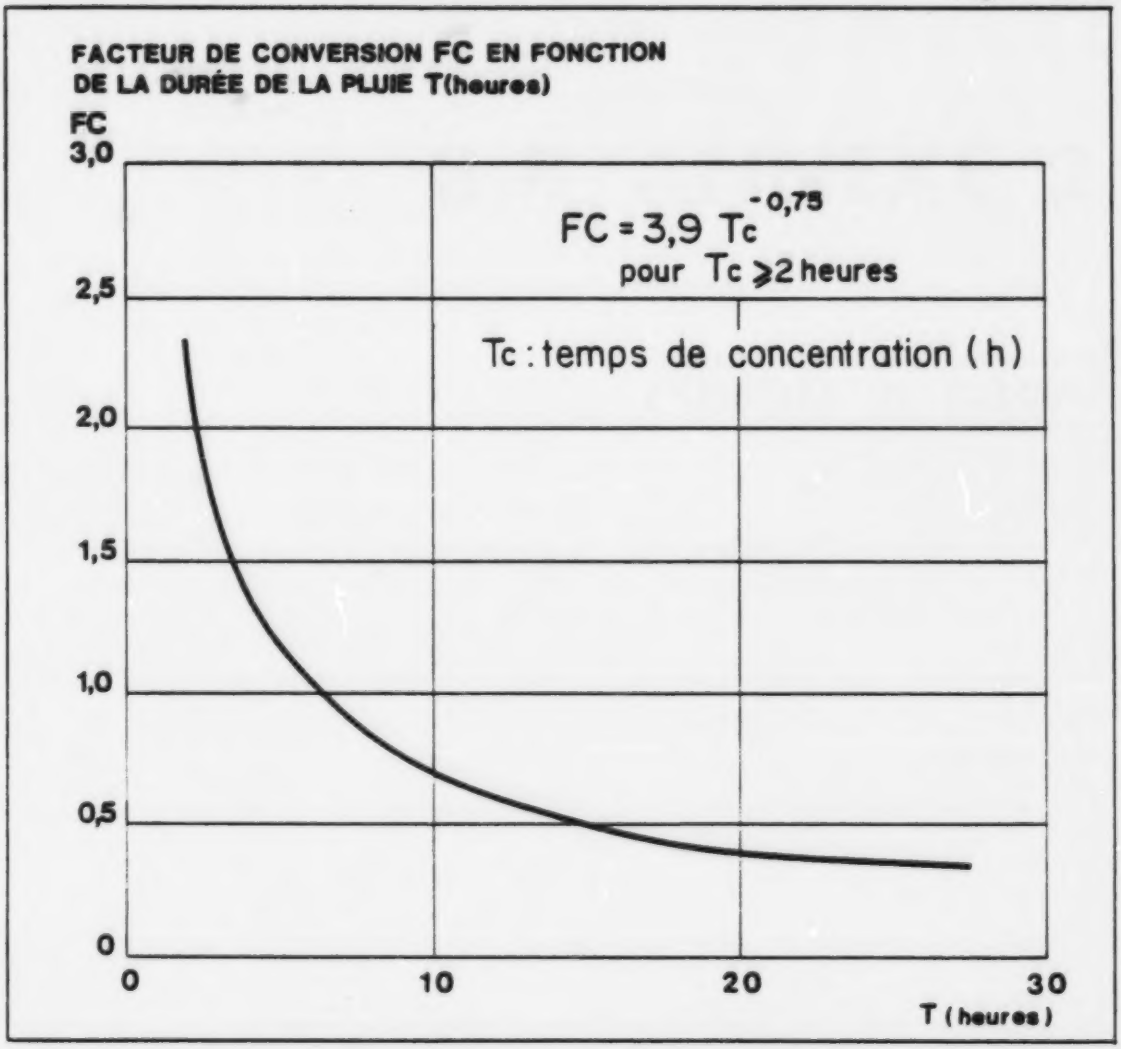
FC = 3,71 pour T = 60 min : $I_{(10,60)} = 3,71 \times 10,33 = 38,28 \text{ mm/h}$

La hauteur d'eau d'une récurrence de 10 ans et d'une pluie maximale d'une durée de 60 minutes est:

$$Hc = I_{(10,60)} \, Tc = 38,28 \text{ mm/h} \, (1 \text{ h}) = 38,28 \text{ mm}$$

- CALCUL DE L'INTENSITÉ D'UNE PLUIE MAXIMALE D'UNE DURÉE DE 2 HEURES ET PLUS, À PARTIR D'UNE PLUIE MAXIMALE D'UNE DURÉE DE SIX HEURES.

Figure 3.15



NOTE: POUR PLUS DE PRÉCISION, RÉFÉREZ-VOUS À L'ATLAS MP-51, QUÉBEC 1974.

EXEMPLE: quelle est l'intensité d'une pluie d'une récurrence de 25 ans et d'une durée de 12 heures $I_{(25,12)}$ pour la ville de Montréal?

Figure 3.11 $I_{(25,6\text{ heures})}$ = 61 mm/6 heures = 10,17 mm/h = $I_{(25,6)}$

FC = 0,61 pour T = 12 h : $I_{(25,12)}$ = 0,61 X 10,17 = 6,20 mm/h

La hauteur d'eau d'une récurrence de 25 ans et d'une pluie maximale d'une durée DP égale à 12 heures est:

$$H_{DP} = H_{12} = I_{(25,12)}\ DP = 6,20 \text{ mm/h (12 heures)} = 74,4 \text{ mm}$$

3.8 ANNEXE 2

EXEMPLES DE CALCUL

3.8 ANNEXE 1: EXEMPLES DE CALCUL

3.8.1 Exemple de calcul de débit de pointe d'un petit bassin versant

Caractéristiques du bassin versant

La méthodologie est présentée à partir d'un exemple concret, le cours d'eau Prévost situé au sud de Montréal près de la frontière américaine dans la municipalité du canton Hemmingford. L'étude d'un bassin versant s'effectue de la façon suivante:

1.- Localisation du bassin versant du cours d'eau à l'étude sur une carte topographique à l'échelle appropriée

2.- Calcul de la superficie du bassin versant (km^2)

A = 2,32 km^2 (figure 3.16)

3.- Calcul de la longueur maximale du parcours de l'eau mesuré de l'embouchure jusqu'au point le plus éloigné hydrauliquement (m)

L = 2 300 m (figure 3.16)

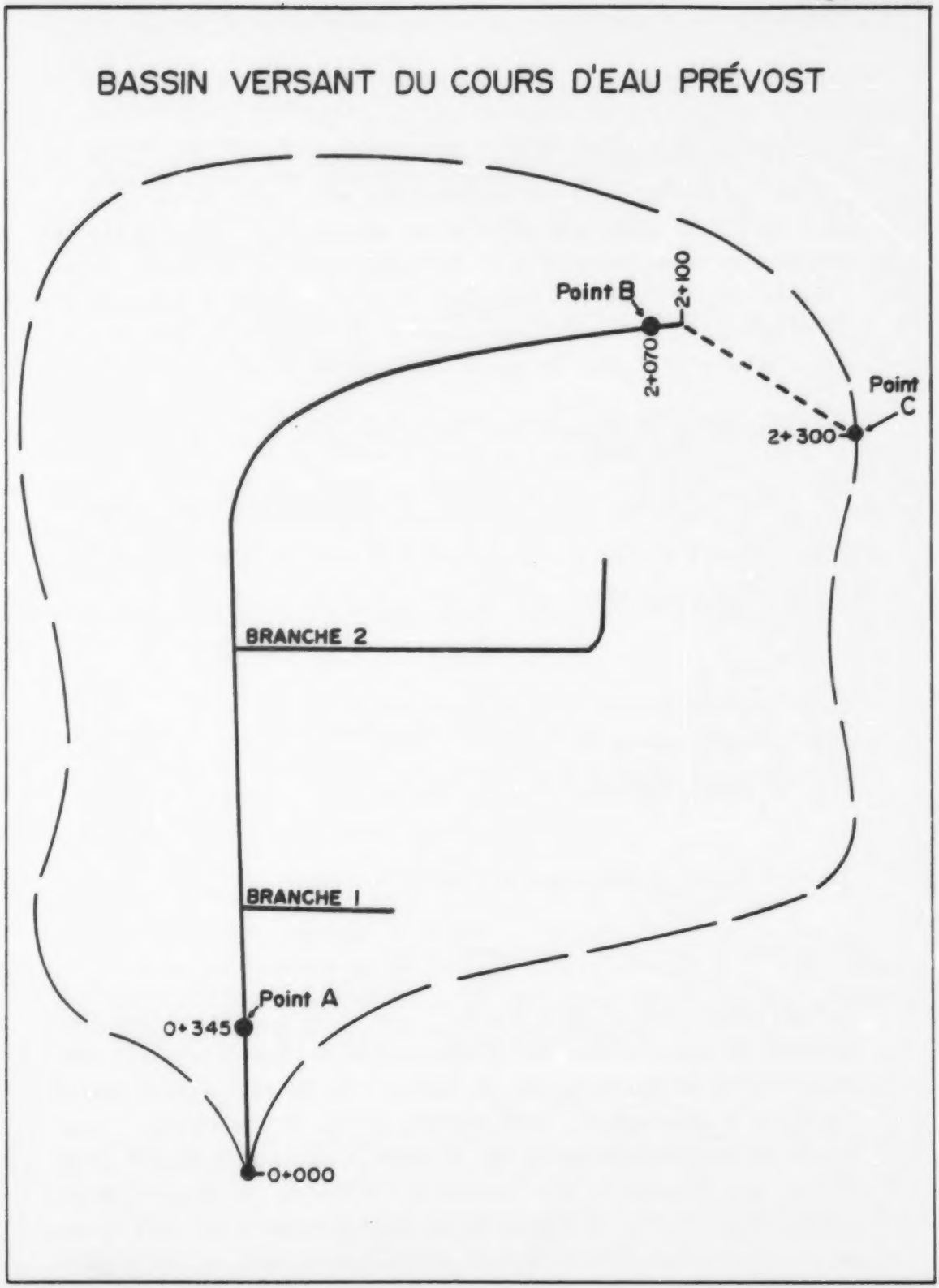
4.- Calcul de la pente moyenne (85-10) du bassin versant (figure 3.16)

	Calcul	Chaînage	Élévation (m)
Point A	$\frac{100-85}{100}$ L = 345	0+345	67,9
Point B	$\frac{100-10}{100}$ L = 2070	2+070	72,0

$$\text{Pente (85-10)} = \frac{B - A}{0,75\ L} = \frac{72,0 - 67,9}{0,75\ (2300)}$$

Pente (85-10) = 0,0024 m/m

Figure 3.16


BASSIN VERSANT DU COURS D'EAU PRÉVOST
Point B
2+100
2+070
Point C
2+300
BRANCHE 2
BRANCHE 1
Point A
0+345
0+000

5.- Détermination du coefficient de ruissellement selon la méthode SCS

A) Délimitation des classes de sol

À partir des différentes textures de sol identifiées sur le bassin à l'étude, délimiter les zones correspondant aux classes de sol A, B, C et D telles qu'elles sont définies au tableau 3.2. Les classes de sol sont définies en fonction de leur capacité d'infiltration. Ainsi la classe A est associée à une capacité d'infiltration très élevée et la classe D est associée à une capacité d'infiltration très faible. Les classes B et C sont des conditions intermédiaires.

Les textures de sol ont été identifiées de la façon suivante:

TEXTURE DE SOL	CLASSE DE SOL	POURCENTAGE DU TOTAL
Sable de Saint-Amable et sable de Botreaux	B	20%
Limon sablo-gravelo-caillouteux de Perrot, Limon fin argileux de Saint-Anicet, limon argileux et terre noire bien décomposée	C	80%

Source: Rapport pédologique du comté d'Huntingdon.

B) Évaluation des conditions hydrologiques

La condition hydrologique qualifie l'état de la couverture végétale, elle est reliée à la capacité d'interception du couvert végétal. Une condition hydrologique pauvre se réfère à un couvert végétal pauvre limitant l'interception donc favorisant le ruissellement. Une condition hydrologique bonne est associée à un couvert végétal bien établi qui favorise l'interception et restreint le ruissellement. Lorsqu'il est difficile d'établir la condition hydrologique à cause de l'évolution du couvert végétal en période de culture, on suggère d'utiliser une condition hydrologique moyenne.

C) Évaluation des pentes du terrain

Les pentes générales du terrain sur le bassin à l'étude sont classées suivant trois catégories: plus petite que 3%, entre 3% et 8% et plus grande que 8%. Dans notre exemple, 100% de la superficie du bassin versant à une pente générale inférieure à 3%.

D) Utilisation du sol

L'utilisation du sol sur la surface du bassin versant se divise en quatre groupes qui se définissent comme suit:

Culture intensive: cultures annuelles tels le maïs, les céréales et l'horticulture qui laissent le sol dénudé à l'automne et au printemps.

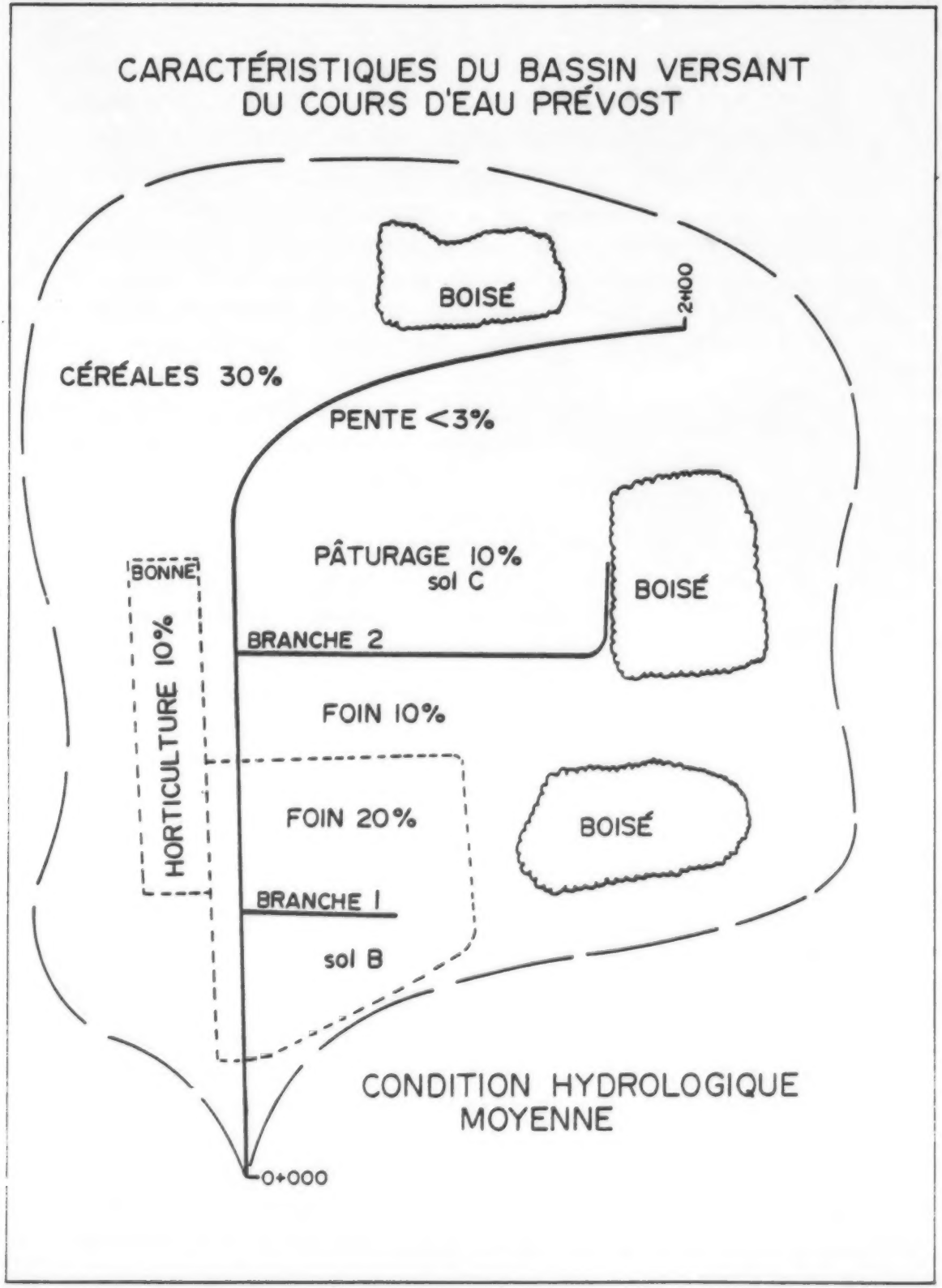
Culture extensive: cultures pluriannuelles tels le foin, les pâturages et les friches herbacées caractérisées par une bonne couverture végétale et un réseau de racines bien développé.

Boisé: surface du couvert forestier.

Résidentielle et commerciale: surface des agglomérations résidentielles ou commerciales.

En superposant les facteurs précédents, c'est-à-dire, classes de sol, conditions hydrologiques et pentes de terrain, on délimite les différentes utilisations du sol sur le bassin versant à l'étude. La figure 3.17 présente l'ensemble des caractéristiques considérées dans l'étude du bassin versant du cours d'eau Prévost.

Figure 3.17


CARACTÉRISTIQUES DU BASSIN VERSANT
DU COURS D'EAU PRÉVOST
BOISÉ
2+100
CÉRÉALES 30%
PENTE <3%
PÂTURAGE 10%
sol C
BOISÉ
BONNE
HORTICULTURE 10%
BRANCHE 2
FOIN 10%
FOIN 20%
BOISÉ
BRANCHE 1
sol B
CONDITION HYDROLOGIQUE
MOYENNE
0+000

L'utilisation du sol en fonction du boisé et des types de culture se résume comme suit:

Pourcentage de surface boisée	20%
Céréales	30%
Foin	30%
Pâturages	10%
Horticulture	10%

Le tableau 3.4 résume les données nécessaires pour obtenir le coefficient de ruissellement. Le numéro de courbe pondéré $\overline{CN}$ est 69.

TABLEAU 3.4

COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT

POUR LE BASSIN DU COURS D'EAU PRÉVOST

MÉTHODE SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS) MODIFIÉE (MONFET 1979)

UTILISATION DU SOL (% DU TOTAL)	SUPERFICIE (% DU TOTAL)	PENTE (%)	CONDITION HYDROLOGIQUE	CLASSE DE SOL	NUMERO DE COURBE
CULTURE INTENSIVE (40)	30	3 %	MOYENNE	C	79
	10	3 %	BONNE	C	78
CULTURE EXTENSIVE (40)	20	3 %	MOYENNE	B	50
	20	3 %	MOYENNE	C	72
TERRAIN BOISE (20)	20	3 %	MOYENNE	C	67

Le numéro de courbe pondéré est: $\overline{CN} = 69$

La courbe retenue (ruissellement/pluie) est: CN 60 - 69

Soit: $Ru = -1{,}97 + 0{,}432\ Hc$ ou voir figure 3.1

Le numéro de courbe pondéré se calcule comme suit:

$$\overline{CN} = \frac{30\ (79)}{100} + \frac{20\ (78)}{100} + \frac{20\ (50)}{100} + \frac{20\ (72)}{100} + \frac{20\ (67)}{100}$$

Le coefficient de ruissellement se détermine comme suit:

$$C = \frac{Ru}{Hc}$$

6.- Détermination du coefficient de ruissellement selon la méthode de Wischmeier

Les facteurs a, b et c sont déterminés à partir du tableau 3.1, page 3-7. Ces facteurs servent au calcul du coefficient de ruissellement selon la formule de Wischmeier. Par suite de l'analyse du bassin versant du cours d'eau Prévost étudié précédemment, les facteurs suivants ont été retenus:

Topographie, facteur a = 0,2
Sol, facteur b = 0,25
Couvert végétal, facteur c = 0,12

$$C = 1 - (0,2 + 0,25 + 0,12)$$
$$C = 1 - (0,57)$$
$$C = 0,43$$

7.- Sélection des données sur les précipitations

Les pluies maximales probables pour une durée de 6 heures et pour des périodes de retour de 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans, pour l'ensemble du Québec se retrouvent aux figures 3.8 à 3.13. Les pluies maximales probables d'une durée de 6 heures pour la municipalité du Canton Hemmingford sont:

PÉRIODE DE RETOUR (année)	HAUTEUR D'EAU (mm)
2	33,0
5	41,0
10	50,0
25	61,0
50	69,0
100	76,0

8.- Application du logiciel

Le logiciel sur l'évluation des débits de pointe pour les petits bassins versants (Laroche et Champagne, Tome 1, 1986) facilite les calculs des temps de concentration, des coefficients de ruissellement et des débits de pointe correspondant à chaque période de retour. Par l'application du logiciel, on obtient le tableau 3.5, présentant les résultats des calculs.

TABLEAU 3.5

DÉBITS DE POINTE DU COURS D'EAU PRÉVOST

ÉVALUATION DES DÉBITS DE POINTE (m^3/s)													
PÉRIODE DE RETOUR (ANNÉE)	COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT	TEMPS DE CONCENTRATION EN HEURES											
		KIRPICH 1,29				BRANSBY WILLIAMS 1,69				MOCKUS 8,24			
		MÉTHODE RATIO.		SCS		MÉTHODE RATIO.		SCS		MÉTHODE RATIO.		SCS	
2	(SCS)	(0,34)				(0,35)				(0,38)			
	SCS ( )	3,8		0,4		3,3		0,5		1,1		0,7	
	WIS. 0,43	4,8		0,5		4,0		0,6		1,2		0,8	
5	(SCS)	(0,36)				(0,37)				(0,39)			
	SCS ( )	5,0		0,5		4,2		0,6		1,4		0,9	
	WIS. 0,43	5,9		0,6		5,0		0,7		1,5		1,0	
10	(SCS)	(0,37)				(0,38)				(0,40)			
	SCS ( )	6,3		0,7		5,3		0,8		1,7		1,2	
	WIS. 0,43	7,2		0,8		6,1		0,9		1,9		1,3	
25	(SCS)	(0,38)				(0,39)				(0,40)			
	SCS ( )	7,9		0,8		6,7		0,9		2,1		1,5	
	WIS. 0,43	8,8		0,9		7,4		1,0		2,3		1,6	
50	(SCS)	(0,39)				(0,39)				(0,41)			
	SCS ( )	9,0		1,0		7,7		1,1		2,4		1,7	
	WIS. 0,43	10,0		1,1		8,4		1,2		2,6		1,8	
100	(SCS)	(0,39)				(0,40)				(0,41)			
	SCS ( )	10,0		1,1		8,5		1,2		2,7		1,8	
	WIS. 0,43	11,0		1,2		9,2		1,3		2,8		1,9	

6,00 HEURES			
MÉTHODE RATIO.		SCS	
(0,37)			
1,3		0,7	
1,5		0,8	
(0,38)			
1,7		0,9	
1,9		1,0	
(0,39)			
2,1		1,1	
2,3		1,2	
(0,40)			
2,6		1,3	
2,8		1,4	
(0,40)			
3,0		1,5	
3,2		1,6	
(0,41)			
3,3		1,7	
3,5		1,8	

MÉTHODE FUGÈRE	COEFFICIENT D'EFFICACITÉ		
	(1,0)	(1,2)	(1,5)
DÉBITS (m^3/s)	BON DRAINAGE 0,5	TRÈS BON DRAINAGE 0,6	EXCELLENT DRAINAGE 0,7

3.8.2 Exemple de calcul de débit de pointe d'un grand bassin versant par la méthode de l'hydrogramme unitaire synthétique

Caractéristiques du bassin versant

Ces données décrivent la partie supérieure de la rivière des Anglais dans la municipalité du canton Hemmingford.

1.- Superficie du bassin versant

$A = 155 \text{ km}^2$

2.- Longueur de parcours de l'eau

$L = 39 \text{ km}$

3.- Pente moyenne (85-10) du bassin versant

	Calcul	Chaînage	Élévation (m)
Point A	$\left(\frac{100-85}{100}\right)L = 5850$	5+850	96
Point B	$\left(\frac{100-10}{100}\right)L = 35100$	35+100	348

$$\text{Pente (85-10)} = S = \frac{B - A}{75\% \, L} = \frac{348-96}{0{,}75 \, (39)} = 8{,}62 \text{ m/km}$$

4.- Couverture forestière

$P_f = 58\%$ (par observation et planimétrie de photos aériennes)

5.- Précipitations

Pluies maximales probables d'une durée de 6 heures (H_6) selon les figures 3.8 à 3.13.

Récurrence (année)	Hauteur d'eau (mm)
2	35
5	46
10	54
25	66
50	71
100	81

6.- Détermination du coefficient de ruissellement

Cultures intensives: 5 %
Cultures extensives: 37 %
Couvert forestier: 58 %

Le tableau 3.6 résume les paramètres nécessaires à la détermination des numéros de courbe pondéré $\overline{CN}$. Les calculs sont effectués au moyen du logiciel sur l'évaluation des débits de pointe pour les grands bassins versants (Laroche et Champagne, Tome 2, 1986), disponible au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

Le numéro de courbe pondéré est:

$\overline{CN}$ = 67

TABLEAU 3.6

CALCUL DU NUMÉRO DE COURBE PONDÉRÉ $\overline{CN}$ POUR LA PARTIE SUPÉRIEURE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE DES ANGLAIS

UTILISATION DU SOL (% DU TOTAL)	TYPE DE CULTURE	SUPERFICIE (% DU TOT.)	PENTE (%)	CONDITION HYDRO-LOGIQUE	CLASSE DE SOL	NUMÉRO DE COURBE
CULTURE INTENSIVE (5%)	Céréales	5	3%	Moyenne	C	79
CULTURE EXTENSIVE (37%)	Pâturages	20	3%	Moyenne	A	32
	Prairies	10	3%	Moyenne	C	72
	Pâturages	5	3%	Moyenne	C	72
	Pâturages	2	3%	Moyenne	D	79
BOISÉ (58%)	Boisé	50	3%	Moyenne	D	76
	Boisé	8	3-8%	Moyenne	D	79
RÉSIDENTIEL ET COMMERCIAL (0%)						

CLASSE DE SOL:

A- GRAVIERS ET SABLES GROSSIERS. (INFILTRATION ÉLEVÉE)
B- SABLES MOYENS ET FINS. (INFILTRATION MOYENNE)
C- SABLES FINS MAL DRAINÉS, SOLS LIMONEUX ET ARGILES PERMÉABLES. (INFILTRATION PASSABLE)
D- ARGILES LOURDES ET SOL MINCES. (INFILTRATION FAIBLE)

$$\overline{CN} = \frac{5\,(79)}{100} + \frac{20\,(32)}{100} + \frac{10\,(72)}{100} + \frac{5\,(72)}{100} + \frac{2\,(79)}{100} + \frac{50\,(76)}{100} + \frac{8\,(79)}{100}$$

$\overline{CN} = 67$

$Ru = -1{,}97 + 0{,}432\ H_{DP}$ ou voir figure 3.1

$C = Ru / H_{DP}$

7.- Calcul des équations de l'hydrogramme unitaire synthétique de 2 heures.

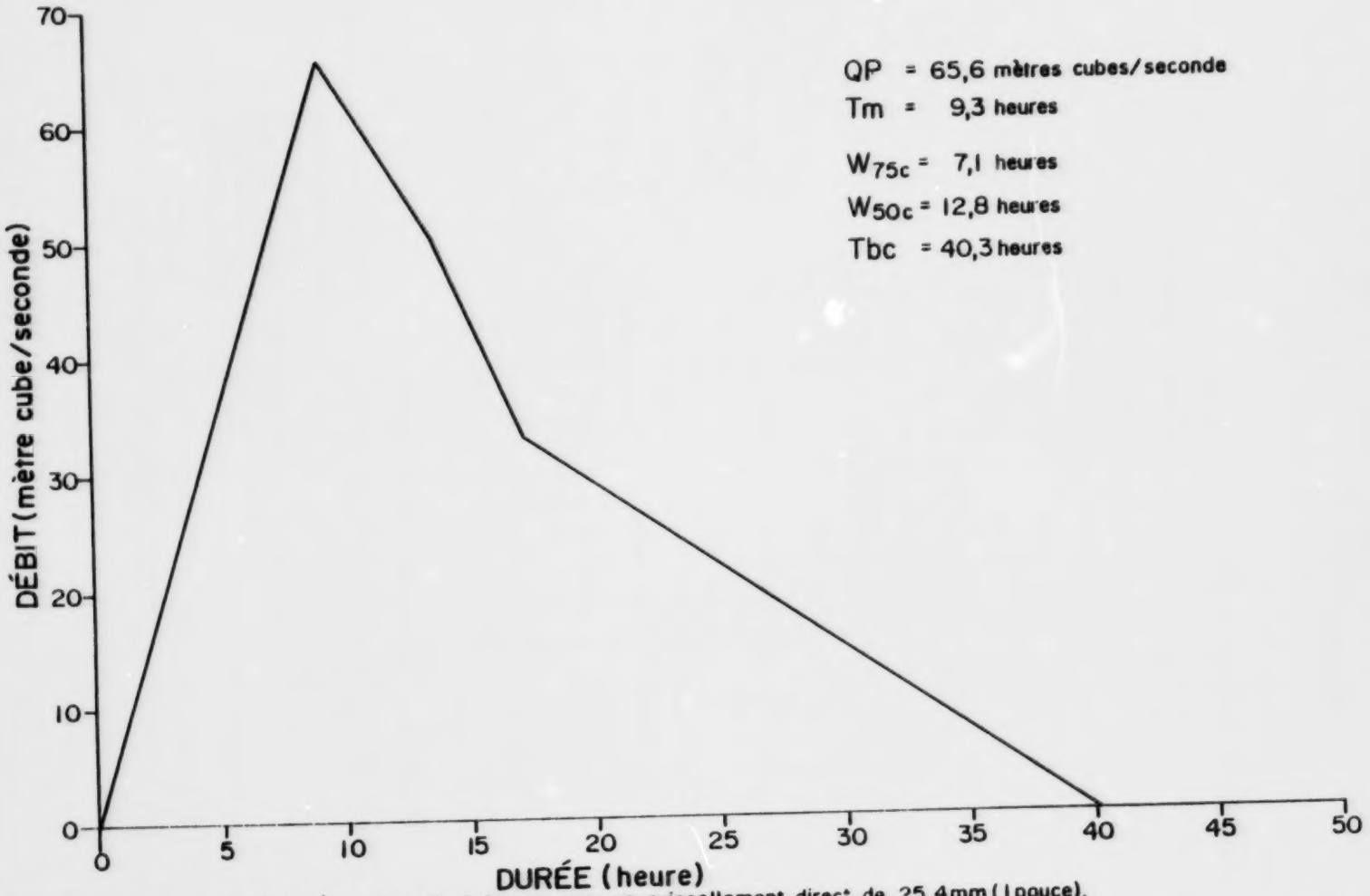
	Équations	Résultats
Qp (2 h)	$= 1{,}54\ A^{0{,}744}$	$= 65{,}6\ m^3/S$
Tm	$= 7{,}5\ e^{(0{,}0073\ L\ -\ 0{,}042\ S\ +\ 0{,}005\ Pf)}$	$= 9{,}3$ heures
Tb	$= 39{,}6 + 0{,}463\ L$	$= 57{,}6$ heures
W_{50}	$= 6{,}43 + 0{,}304\ L$	$= 18{,}3$ heures
W_{75}	$= 2{,}94 + 0{,}185\ L$	$= 10{,}1$ heures
Rs	$= 3{,}6\ (0{,}25W_{75} + 0{,}375W_{50} + 0{,}25Tb)\ \frac{Qp}{A}$	$= 36{,}3$ mm
Tbc	$= Tb\ \frac{25{,}4}{Rs} = \frac{57{,}6\ (25{,}4)}{36{,}3}$	$= 40{,}3$ heures
W_{50c}	$= W_{50}\ \frac{25{,}4}{Rs} = \frac{18{,}3\ (25{,}4)}{36{,}3}$	$= 12{,}8$ heures
W_{75c}	$= W_{75}\ \frac{25{,}4}{Rs} = \frac{10{,}1\ (25{,}4)}{36{,}3}$	$= 7{,}1$ heures

8.- Traçage de l'hydrogramme de 2 heures

Voir la figure 3.18 à la page suivante:

Figure 3.18

HYDROGRAMME UNITAIRE SYNTHÉTIQUE PARTIE SUPÉRIEURE DE LA RIVIÈRE DES ANGLAIS



NOTE : Hydrogramme résultant d'une pluie de 2 heures avec un ruissellement direct de 25,4mm (1 pouce).
Sur la superficie du bassin versant égale à 155 km carrés.

9.- Convolution de l'hydrogramme

Le logiciel sur l'évaluation des débits de pointe pour les grands bassins versants (Laroche et Champagne, Tome 2, 1986), permet d'obtenir la convolution de l'hydrogramme pour des durées de pluie variant de 2 à 24 heures afin de déterminer le débit de pointe maximal. Pour l'exemple qui nous intéresse, la pluie d'une durée de 12 heures engendre les débits de pointe maximaux. La figure 3.19 illustre les convolutions des hydrogrammes pour des durées de pluie variant de 2 à 24 heures et pour une récurrence de 10 ans. Le débit de pointe maximal est de 53,01 m^3/s.

10.-Estimation des débits de pointe pour différentes récurrences

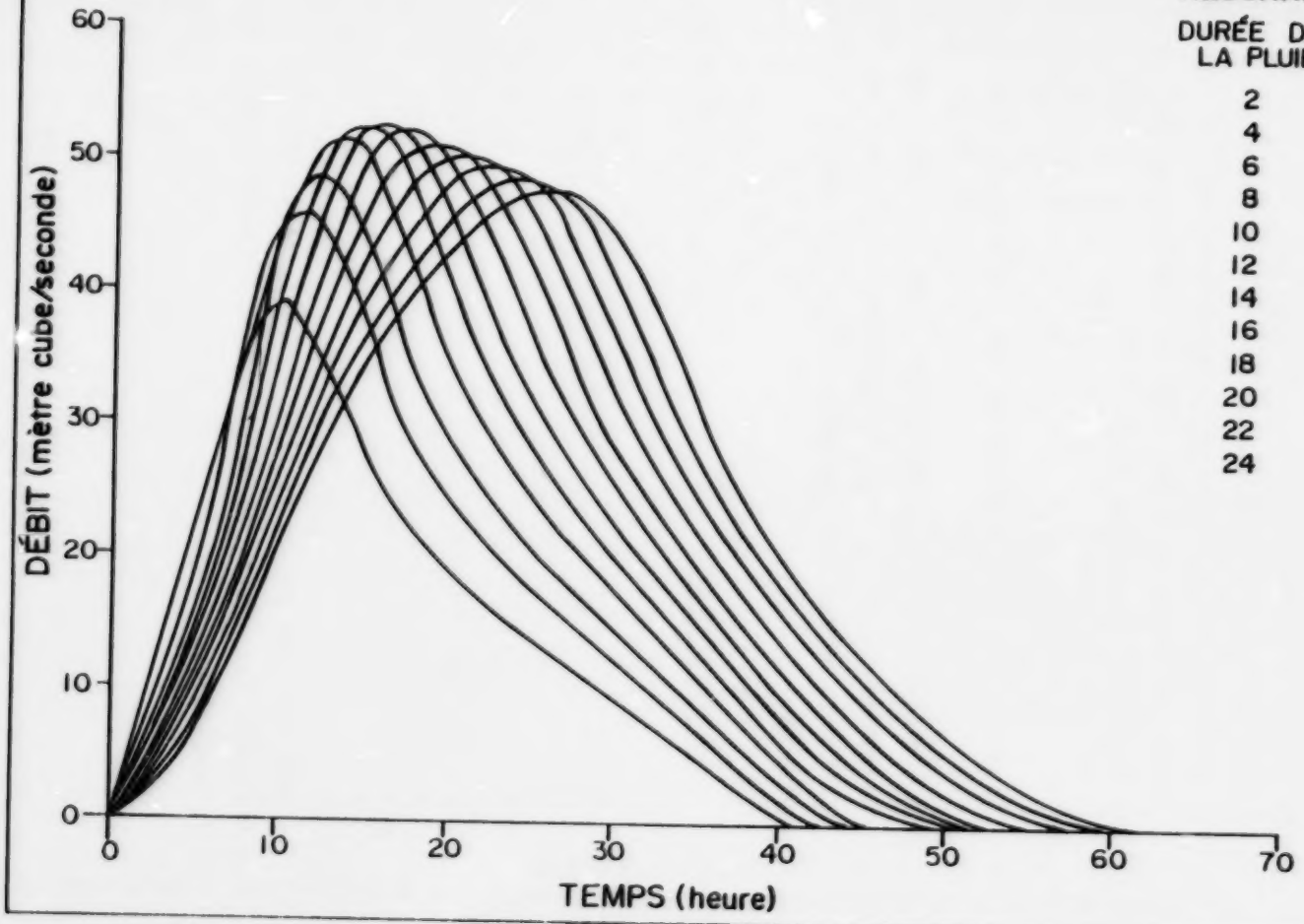
Le logiciel (Laroche et Champagne, Tome 2, 1986) permet de calculer les débits de pointe pour différentes récurrences et de tracer les différents hydrogrammes (figure 3.20). Les débits calculés sont les suivants:

Récurrence (an)	Débit de pointe (m^3/s)
2	33,0
5	44,6
10	53,0
25	65,7
50	71,0
100	81,5

Comme pour les petits bassins versants, il existe plus d'une méthode pour estimer les débits de pointe. Ces méthodes donnent des résultats assez semblables.

Figure 3.19

CONVOLUTION DES HYDROGRAMMES UNITAIRES SYNTHÉTIQUES (2à24heures) POUR LA PARTIE SUPÉRIEURE DE LA RIVIÈRE DES ANGLAIS

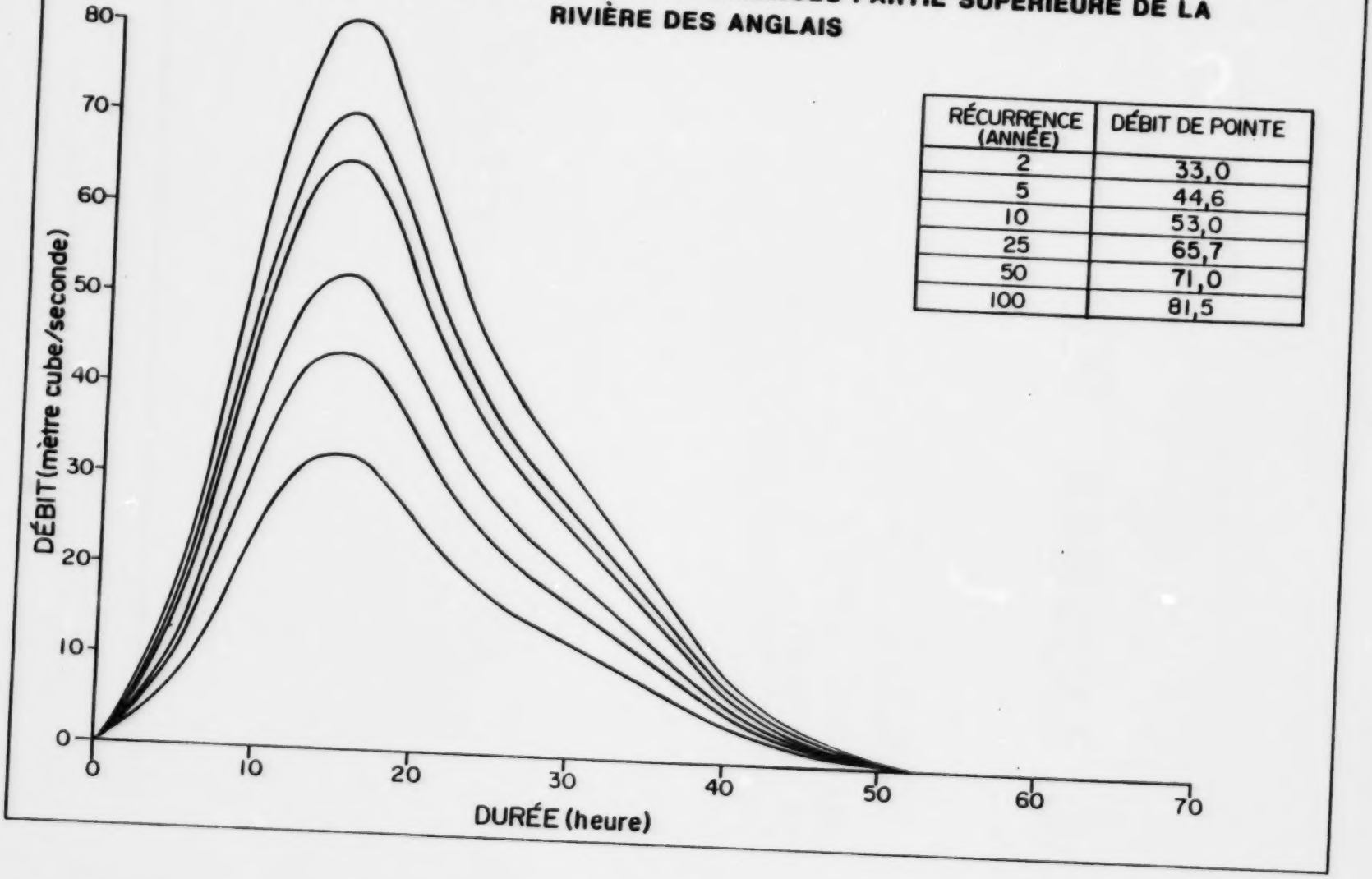


RÉCURRENCE = 10 ans

DURÉE DE LA PLUIE	DÉBIT DE POINTE
2	39,94
4	45,91
6	49,35
8	52,23
10	52,73
12	53,01
14	52,28
16	51,48
18	50,85
20	50,18
22	49,38
24	48,45

Figure 3.20

HYDROGRAMMES SYNTHÉTIQUES RÉSULTANTS D'UNE PLUIE MAXIMALE PROBABLE DE 12 HEURES POUR DIFFÉRENTES RÉCURRENCES PARTIE SUPÉRIEURE DE LA RIVIÈRE DES ANGLAIS



RÉCURRENCE (ANNÉE)	DÉBIT DE POINTE
2	33,0
5	44,6
10	53,0
25	65,7
50	71,0
100	81,5

3.9 ANNEXE 3

LISTE DES PARAMÈTRES
UTILISÉS DANS LE
CHAPITRE 3

3.9 ANNEXE 3: LISTE DES PARAMÈTRES UTILISÉS DANS LE CHAPITRE 3

A : superficie d'un bassin versant (ha, km^2 ou mi^2)

a : facteur de topographie dans la formule de Wischmeier

A_j : superficie d'un bassin versant à une station de jaugeage (km^2)

B : altitude moyenne du centre de gravité du bassin versant moins l'altitude au point le plus bas du bassin versant (m)

b : facteur de sol dans la formule de Wischmeier

C : coefficient de ruissellement

c : facteur de couvert végétal dans la formule de Wischmeier

CN : numéro de courbe associé aux caractéristiques physiques et à l'utilisation du sol d'un secteur d'un bassin versant

$\overline{CN}$: numéro de courbe pondéré représentant l'ensemble des caractéristiques d'un bassin versant

DP : durée de précipitation d'une pluie maximale probable de récurrence donnée (heure)

e : constante népérienne égale à 2,718

F : variable de pente dans l'équation de Fugère

FC : facteur de conversion en fonction de la durée de la pluie

F_6 : coefficient à appliquer à la valeur du débit de pointe Qp (2 heures) lors de la sommation graphique de 3 hydrogrammes unitaires synthétiques espacés de 2 heures chacun (ce coefficient est fonction de la superficie du bassin versant)

F_{12} : coefficient à appliquer à la valeur du débit de pointe Qp (2 heures) lors de la sommation graphique de 6 hydrogrammes unitaires synthétiques espacés de 2 heures chacun (ce coefficient est fonction de la superficie du bassin versant)

H : hauteur d'eau précipitée durant le temps T (mm)

Hc : hauteur d'eau correspondant à la pluie maximale probable pour une durée égale au temps de concentration Tc du bassin versant et pour une récurrence donnée (mm)

H_{DP} : hauteur d'eau correspondant à la pluie maximale probable pour une durée égale à DP et pour une récurrence donnée (mm)

H_6 : hauteur d'eau correspondant à la pluie maximale probable pour une durée de 6 heures et pour une récurrence donnée (mm)

H_{12} : hauteur d'eau correspondant à la pluie maximale probable pour une durée de 6 heures et pour une récurrence donnée (mm)

I : intensité de la précipitation (mm/h)

K : variable de pente dans l'équation de Fugère

L : longueur maximale de parcours de l'eau dans un bassin versant (m ou km)

L_c : longueur caractéristique correspondant à la distance entre le point du cours d'eau le plus proche du centre de gravité du bassin versant et l'exutoire (km)

n : coefficient variant selon le degré de similitude entre deux bassins versants comparés

NH : nombre d'hydrogrammes unitaires synthétiques d'une durée de 2 heures

P_f : pourcentage de couvert forestier, pour 90% de couvert forestier, on utilise la valeur entière 90 et non 0,90 (%)

Q : débit (m^3/s)

Qe : débit moyen d'étiage de 30 jours consécutifs d'une récurrence de deux ans (l/s)

Q_j : débit enregistré à une station de jaugeage (m^3/s)

Qp : débit de pointe (m^3/s)

Qp (2 heures) : débit de pointe calculé selon la méthode de l'hydrogramme unitaire synthétique pour une pluie de 2 heures et un ruissellement de 25,4 mm (m^3/s)

Qp (6 heures) : débit de pointe provoqué par une pluie maximale probable d'une durée de 6 heures (m^3/s)

Qp (12 heures): débit de pointe provoqué par une pluie maximale probable d'une durée de 12 heures (m^3/s)

Q_r : débit recherché au site non jaugé (m^3/s)

Q_s : débit selon la méthode de Fugère (m^3/s)

R : différence maximale potentielle entre la précipitation et le ruissellement à partir du début de la précipitation

Ru : ruissellement correspondant à la hauteur de la lame d'eau ruisselée (mm)

Rs : hauteur d'eau ruisselée calculée selon la formule hauteur d'eau de l'hydrogramme unitaire synthétique (mm)

S : pente moyenne d'un bassin versant (m/m, m/km ou %)

T : temps ou durée de la pluie (heure)

Tb : temps de base de l'hydrogramme unitaire synthétique (heure)

Tbc : temps de base corrigé correspondant au produit de Tb par (25,4 / Rs) (heure)

Tc : temps de concentration d'un bassin versant (heure ou minute)

Tm : temps de montée dans la méthode de l'hydrogramme unitaire synthétique (heure)

Tr : période de retour ou récurrence (année)

W_{50} : temps durant lequel le débit excède la valeur de 50% du débit de pointe calculé pour l'hydrogramme unitaire synthétique (heure)

W_{50c} : W_{50} corrigé, correspondant au produit de W_{50} par (25,4/Rs) (heure)

W_{75} : temps durant lequel le débit excède la valeur de 75% du débit de pointe calculé pour l'hydrogramme unitaire synthétique (heure)

W_{75c} : W_{75} corrigé, correspondant au produit de W_{75} par (25,4/Rs) (heure)

X_{50} : localisation temporelle de la fin du W_{50c} sur l'hydrogramme unitaire synthétique (heure)

X_{75} : localisation temporelle de la fin du W_{75c} sur l'hydrogramme unitaire synthétique (heure)

CHAPITRE 4

CONCEPTION D'UN PROJET D'AMÉNAGEMENT DE COURS D'EAU

CHAPITRE 4

CONCEPTION D'UN PROJET D'AMÉNAGEMENT DE COURS D'EAU

		Page
4.1	Généralités	4-6
4.1.1	Rôle du cours d'eau	4-6
4.1.2	Types d'écoulement	4-8
4.2	Conception hydraulique	4-12
4.2.1	Profondeur	4-14
4.2.2	Ligne de fond projetée	4-14
4.2.3	Choix de la section	4-15
4.2.3.1	Pente des talus	4-15
4.2.3.2	Largeur au fond	4-17
4.2.3.3	Autres formes de sections	4-19
4.2.4	Calculs hydrauliques	4-21
4.2.4.1	Coefficient de rugosité	4-21
4.2.4.2	Hauteur hydraulique maximale	4-26
4.2.4.3	Vitesse d'écoulement	4-27
4.2.4.4	Vitesse maximale	4-28
4.2.4.5	Force tractrice critique	4-30
4.2.4.6	Rayon de courbure	4-31
4.2.4.7	Méandres	4-32
4.2.5	Calcul de la courbe de remous	4-33
4.3	Stabilité mécanique des sols	4-36
4.3.1	Caractéristiques physiques des sols	4-36
4.3.1.1	Granulométrie	4-37
4.3.1.2	Limites d'Atterberg et indice de plasticité	4-37

		Page
4.3.1.3	Classification	4-39
4.3.1.4	Autres caractéristiques	4-42
4.3.2	Instabilités dues à l'eau	4-42
4.3.2.1	Vitesse maximale permise	4-42
4.3.2.2	Force tractrice	4-45
4.3.2.2.1	Force tractrice maximale	4-45
4.3.2.2.2	Force tractrice critique	4-47
4.3.2.2.3	Méthode de la force tractrice	4-49
4.3.2.3	Boulance	4-50
4.3.3	Propriétés mécaniques	4-52
4.3.4	Instabilités dues au sol	4-52
4.3.5	Considérations générales sur la stabilité des talus	4-60
4.4	Correction de la pente longitudinale par l'aménagement de seuils	4-64
4.5	Tolérances d'exécution	4-65
4.6	Annexe 1: Exemples de calculs	4-67
4.6.1	Exemple de calculs hydrauliques	4-68
4.6.2	Stabilité des talus: exemple de calcul du facteur de sécurité dans une argile homogène	4-84
4.7	Annexe 2: Propriétés géométriques des canaux	4-87
4.8	Annexe 3: Liste des paramètres utilisés dans le chapitre 4	4-89

LISTE DES FIGURES

		Page
4.1	Profil transversal type	4-7
4.2	Rapport largeur au fond/hauteur d'écoulement	4-18
4.3	Sections de cours d'eau	4-20
4.4	Variation de la rugosité en fonction du couvert végétal	4-25
4.5	Évaluation de la revanche (en terrain plat)	4-26
4.6	Courbes granulométriques	4-38
4.7	Charte de plasticité de Casagrande	4-41
4.8	Vitesse de base et facteurs de correction pour le calcul de la vitesse maximale permise dans les canaux en terre non protégés en fonction de la classification du sol	4-44
4.9	Proportion entre la force tractrice maximale par unité de surface mouillée et le produit $\gamma_w R_h S_o$, pour une section trapézoïdale	4-46
4.10	Force tractrice critique par unité de surface mouillée	4-48
4.11	Boulance	4-51
4.12	Illustration d'un scissomètre	4-53
4.13	Méthode du cercle de rupture (sols cohérents)	4-55
4.14	Nombre de stabilité m pour $\phi = 0°$	4-58
4.15	Nombre de stabilité m pour $\phi \neq 0°$	4-59
4.16	Distance entre les seuils	4-64
4.17	Profil du cours d'eau Dubois	4-69
4.18	Courbe granulométrique de la série Bedford, horizon Ckg	4-72

LISTE DES TABLEAUX

		Page
4.1	Classification des écoulements	4-8
4.2	Pentes de talus recommandées	4-16
4.3	Types de cours d'eau et rugosité "n"	4-22
4.4	Vitesses maximales recommandées par Fortier et Scobey et forces tractrices critiques correspondantes proposées par le U.S. Bureau of Reclamation	4-29
4.5	Rayon de courbure minimal	4-31
4.6	Limites d'Atterberg	4-37
4.7	Plasticité	4-39
4.8	Classification des sols	4-40
4.9	Vitesse maximale permise dans les canaux en terre non protégés	4-43
4.10	Instabilités dues à l'eau	4-61
4.11	Instabilités reliées aux types de sol	4-62
4.12	Instabilités résultant des facteurs externes	4-63
4.13	Caractéristiques de la série Bedford	4-71
4.14	Résumé des calculs hydrauliques du cours d'eau Dubois	4-76

4 CONCEPTION D'UN PROJET D'AMÉNAGEMENT DE COURS D'EAU

L'objectif premier de l'aménagement d'un cours d'eau est le drainage et la protection des terres agricoles situées à l'intérieur du bassin versant.

La méthodologie proposée est fonction de l'étude complète d'un projet où il faut résoudre un problème d'évacuation des eaux ou d'inondation de terres agricoles en période de culture.

4.1 GÉNÉRALITÉS

4.1.1 Rôle du cours d'eau

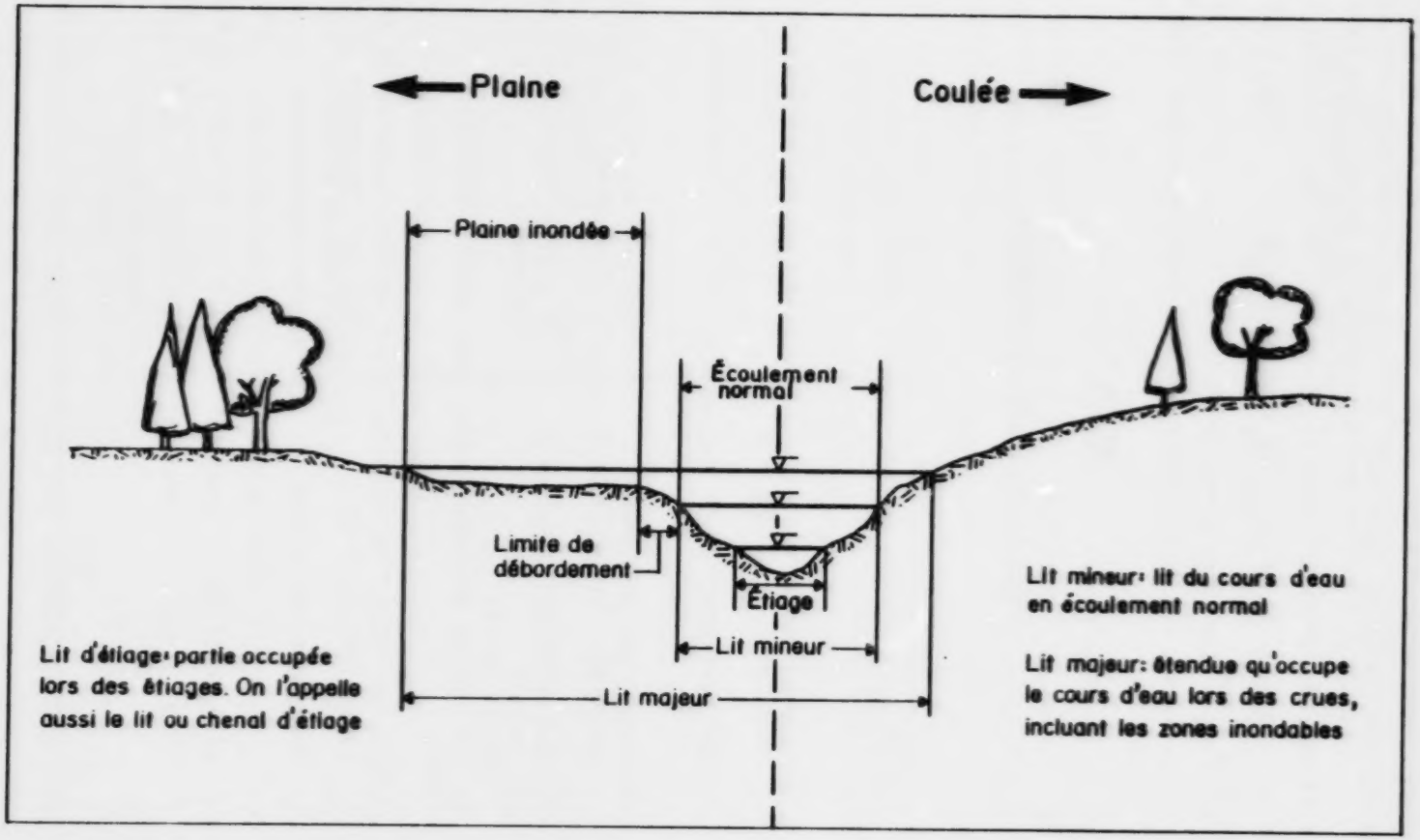
La fonction principale d'un cours d'eau est d'évacuer les eaux de ruissellement provenant des fossés secondaires ainsi que les eaux de drainage souterrain, de nappes ou de sources formant le débit du bassin versant. Le projet d'aménagement sera préparé en fonction du débit correspondant à la récurrence choisie, en tenant compte des caractéristiques du milieu et des contraintes à respecter:

- réception et écoulement de l'eau (contenu);
- propriétés physiques du sol (contenant);
- utilisation du milieu (facteurs externes).

La section du cours d'eau doit être suffisante pour évacuer l'eau sans provoquer d'inondation, sauf en dehors de la récurrence choisie. Dans une plaine, on considère que toute l'eau doit s'écouler dans la section creusée. Lorsqu'un cours d'eau est situé dans une coulée, la superficie inondable est généralement faible et souvent il n'est pas justifié, même économiquement, de canaliser tout le volume d'eau dans la section excavée (voir figure 4.1).

Figure 4.1

PROFIL TRANSVERSAL TYPE



4.1.2 Types d'écoulement

La classification des écoulements à surface libre se base sur des critères de forces qui sont mises en jeu, sur des critères d'espace et sur des critères de temps. Une combinaison de ces critères définit le type d'écoulement.

TABLEAU 4.1

CLASSIFICATION DES ÉCOULEMENTS

Écoulement	Définition
1 - Permanent, non permanent Permanent : $\partial V/\partial t = 0$ Non permanent: $\partial V/\partial t \neq 0$	Basé sur des critères de temps; la vitesse est constante ou variable dans le temps en un point de l'écoulement.
2 - Uniforme, non uniforme Uniforme : $\partial V/\partial L = 0$ Non uniforme: $\partial V/\partial L \neq 0$ (appelé aussi varié) ex: courbe de remous	Basé sur des critères d'espace; la vitesse est constante ou variable entre deux points sur le profil longitudinal de l'écoulement.
3 - Laminaire, turbulent Laminaire: $Re < 500$ Turbulent: $Re > 2000$	Basé sur le nombre de Reynolds (Re) qui représente le rapport des forces d'inertie sur les forces visqueuses.
4 - Fluvial, critique, torrentiel	Basé sur le nombre de Froude (Fr) qui représente le rapport des forces d'inertie sur les forces de gravité (voir page 4-9).

L'écoulement de la veine liquide dans un cours d'eau est presque toujours du type turbulent, par opposition à un écoulement laminaire. L'écoulement laminaire se retrouve au voisinage immédiat des solides ou lorsque l'écoulement devient très lent.

Le débit de calcul est fixé par une méthode hydrologique, et ce débit est considéré stable (écoulement permanent) par opposition à un débit variant rapidement dans le temps (écoulement non permanent).

L'écoulement peut être fluvial (sous-critique) ou torrentiel (super-critique), suivant que l'énergie cinétique, composante ($V^2/2g$), est faible et même négligeable, ou au contraire de première importance, dans l'énergie spécifique de l'eau en mouvement.

Le nombre de Froude (Fr) permet de caractériser le type d'écoulement, fluvial, critique ou torrentiel.

Forme générale: $$Fr = \frac{V}{\sqrt{g\,(A/\ell)}}$$

pour un canal large: $$Fr = \frac{V}{\sqrt{g\,y}} \quad \text{où} \quad y = A/\ell = (b\,y)/b$$

Fr : nombre de Froude (sans dimension)
V : vitesse moyenne de l'eau (m/s)
A : aire de la section d'écoulement (m^2)
ℓ : largeur au miroir (m)
y : hauteur hydraulique (m)
g : constante gravitationnelle (9,8 m/s^2)

si $Fr < 1$: écoulement fluvial (sous-critique), lent et calme $y > y_c$

si $Fr = 1$: écoulement critique très instable et ondulant
$y = y_c$ = hauteur critique

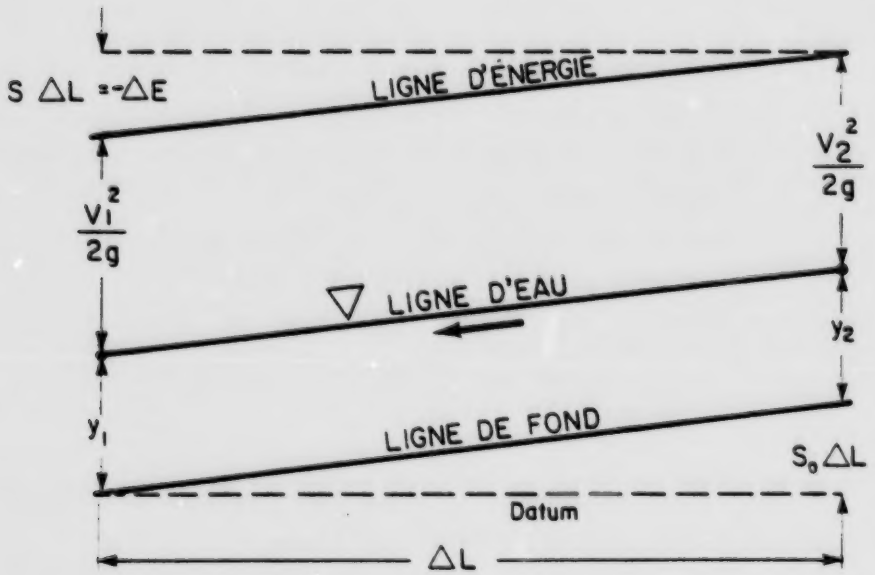
si $Fr > 1$: écoulement torrentiel (super-critique), rapide et saccadé $y < y_c$

Un écoulement torrentiel ne doit se produire que près des structures de contrôle et/ou lorsque les vitesses sont examinées et trouvées acceptables; sinon on préconise des mesures de protection. Les cours d'eau aménagés dans des sols friables ne permettent pas ce type d'écoulement sans revêtement.

L'écoulement fluvial peut être caractérisé par un écoulement uniforme ou non uniforme.

L'écoulement est uniforme, dans un même tronçon de cours d'eau, lorsque la vitesse est identique à chaque point. Dans la grande majorité des cours d'eau, c'est ce type d'écoulement qui prévaut puisque la vitesse d'écoulement s'ajuste à la pente, à la section et à la rugosité pour se stabiliser, de sorte que la pente de la ligne d'énergie est parallèle à la pente du fond. La perte d'énergie permettant l'écoulement fait en sorte que la pente de la ligne d'énergie est parallèle à la pente du cours d'eau ($S = S_0$). La hauteur d'écoulement est alors constante et égale à la hauteur normale y_n de sorte que $y_1 = y_n = y_2$.

Bilan d'énergie



$$\frac{V_1^2}{2g} + y_1 + S\Delta L = \frac{V_2^2}{2g} + y_2 + S_o \Delta L \quad \text{(Équation de Bernouilli)}$$

V : vitesse moyenne de l'eau (m/s)
g : constante gravitionnelle (9,8 m/s^2)
y : hauteur hydraulique (m)
ΔL : distance entre deux points d'un tronçon (m)
S_o : pente du fond du cours d'eau (m/m)
S : pente de la ligne d'énergie (m/m)

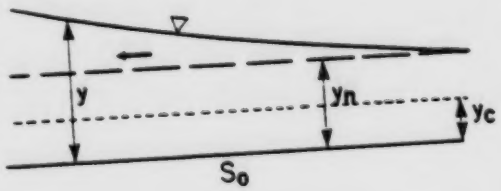
$$S = \left(\frac{nQ}{A\ R_h^{\ 2/3}} \right)^2$$

n : coefficient de rugosité
Q : débit (m^3/s)
A : aire de la section d'écoulement (m^2)
R_h : rayon hydraulique (m)

Par contre, l'écoulement est non uniforme dans un même tronçon, lorsque la vitesse d'écoulement varie le long du profil, sur une même longitudinale. On a alors un profil d'écoulement spécifique que l'on appelle "courbe de remous" (voir section 4.2.5).

Types de courbes de remous

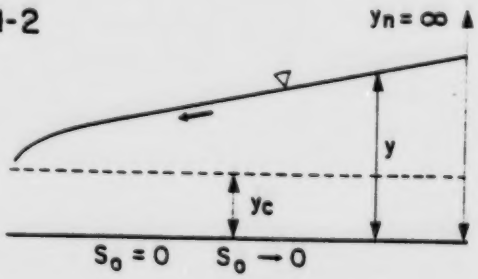
M-1



Lorsqu'une section aval crée un obstacle (pont, étranglement, seuil) ou que le cours d'eau entre dans la zone de refoulement (émissaire, lac).

$y > y_n > y_c$

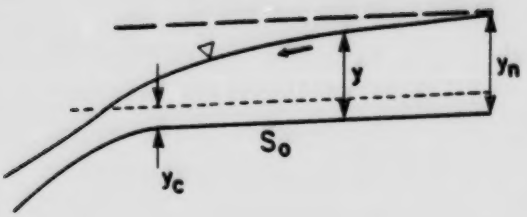
H-2



Lorsqu'un tronçon de cours d'eau est situé dans un secteur sans pente ou à pente très faible, la hauteur d'écoulement augmente vers l'amont.

$y > y_c$

M-2



Lorsque le cours d'eau approche une pente raide, un élargissement important ou un réservoir d'un niveau inférieur.

$y_n > y > y_c$

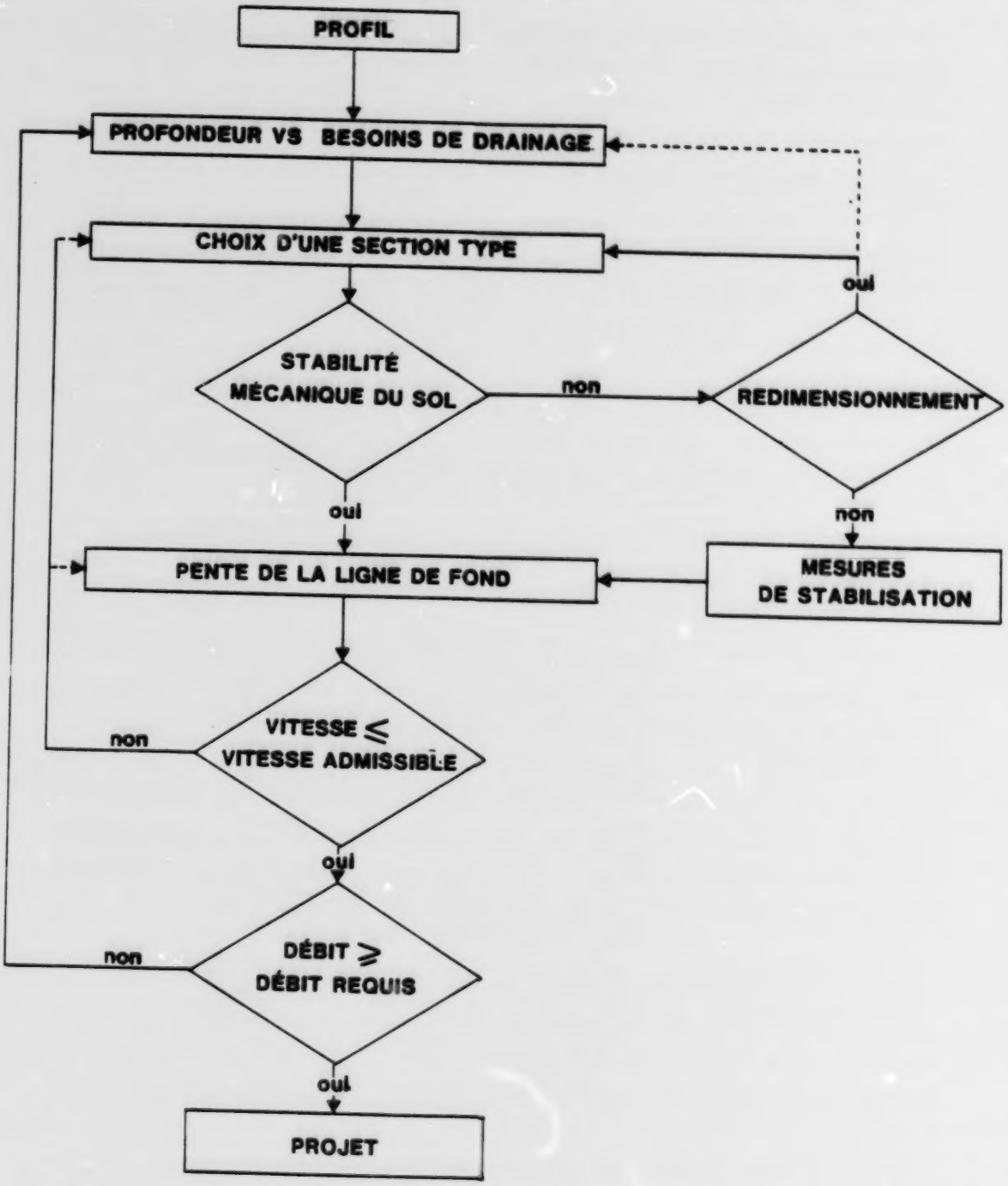
En d'autres mots, la pente de la ligne de la surface de l'eau qui, en écoulement uniforme est parallèle à la ligne du fond du cours d'eau, ne l'est plus en écoulement non-uniforme. Dans ce dernier cas, la méthodologie de calcul par la formule de Manning n'est plus exacte et le calcul de la courbe de remous répond au besoin de dimensionnement d'une section suffisante.

4.2 CONCEPTION HYDRAULIQUE

La conception d'un projet d'aménagement de cours d'eau se fait suivant un cheminement itératif. Les objectifs à atteindre sont:

- la collecte des eaux de surface et du drainage souterrain;
- l'évacuation de ces eaux sans inondation en période de culture, en fonction de la récurrence choisie pour l'établissement du débit de pointe;
- la stabilité et la pérennité des ouvrages.

Les différents points qui sont analysés au fur et à mesure de l'étude, une fois les plans de base et le profil longitudinal établis, sont décrits dans le cheminement illustré à la page suivante.


PROFIL
PROFONDEUR VS BESOINS DE DRAINAGE
CHOIX D'UNE SECTION TYPE
STABILITÉ MÉCANIQUE DU SOL
non
REDIMENSIONNEMENT
oui
oui
non
PENTE DE LA LIGNE DE FOND
MESURES DE STABILISATION
VITESSE ≤ VITESSE ADMISSIBLE
non
oui
DÉBIT ≥ DÉBIT REQUIS
non
oui
PROJET

4.2.1 Profondeur

Quelques points de fond projeté sont d'abord installés le long du profil pour assurer:

- le drainage de zones basses;

- la sortie des systèmes de drainage souterrain, à condition qu'ils ne soient pas plus profonds que le strict minimum requis pour les terres adjacentes et qu'ils ne mettent pas en jeu la stabilité du cours d'eau.

Pour évacuer les débits, on augmente la largeur au fond plutôt que la profondeur. La pente des talus, si elle gagne à être adoucie, peut servir à augmenter la capacité du cours d'eau.

4.2.2 Ligne de fond projetée

La pente projetée d'un cours d'eau suit le plus possible la pente générale du terrain. Cependant, la pente longitudinale doit être suffisante pour permettre une vitesse d'écoulement minimale. Une diminution de la pente longitudinale est nécessaire si la vitesse d'écoulement calculée est supérieure à la vitesse maximale permise. La construction d'un barrage-seuil permet de réduire la pente longitudinale pour obtenir une vitesse maximale acceptable. À son niveau, le barrage-seuil provoque un écoulement torrentiel et une turbulence qui dissipe l'énergie.

Le respect des vitesses maximales doit aider à déterminer une pente longitudinale qui se rapproche de la pente de compensation du cours d'eau, c'est-à-dire la pente établie lorsque le cours d'eau a atteint un état de stabilité. Les ruptures trop brusques sont à déconseiller.

L'établissement de la ligne de fond projetée est aussi fonction des points bas établis sur le profil.

Pour éviter le creusage excessif dans les petits bassins versants, les stations de pompage offrent une alternative technique. L'installation d'une station de pompage pour le drainage souterrain est parfois suffisante pour résoudre les problèmes de drainage sans avoir à refaire le cours d'eau sur plusieurs kilomètres. L'intervention de moindre impact devrait primer dans des cas semblables car elle entraîne moins d'effets négatifs et demande moins de mesures correctives.

Finalement, un choix sera à faire dans les terrains plats entre une pente très faible et une section plus grande, et une pente plus forte et une excavation plus importante en aval.

4.2.3 Choix de la section

4.2.3.1 Pente des talus

L'instabilité des talus d'un cours d'eau contribue de façon importante à diminuer sa durée de vie. La stabilité des talus dépend du type de sol et des conditions d'eau dans le sol et dans le cours d'eau. Les principaux facteurs qui influencent la stabilité des talus sont:

- les propriétés mécaniques du sol;
- la résistance aux forces d'arrachement (forces tractrices);
- le suintement des parois (boulance);
- les glaces.

La diminution de la pente des talus permet de réduire l'influence de ces facteurs sur la stabilité des talus.

Le tableau 4.1 indique les pentes de talus recommandées selon le type de sol.

Règle générale, c'est-à-dire dans tous les sols possèdant une certaine cohésion, la profondeur affecte directement la stabilité. Aussi l'approche suivante est préconisée; l'ouverture du cours d'eau est au moins égale à 3, 3,5 ou 4 fois la profondeur de celui-ci, plus la largeur au fond excédant 1 mètre, de sorte que la pente des talus se corrige à la baisse automatiquement dans les secteurs plus profonds. Par cette approche on peut calculer la pente des talus équivalente en fonction de la profondeur comme le montre le tableau 4.1. La pente des talus s'exprime toujours comme suit: **VERTICAL : HORIZONTAL.**

TABLEAU 4.2

PENTES DES TALUS RECOMMANDÉES

TYPE DE SOL	PENTE DES TALUS (1 : z)	Approche pouvant être utilisée *			
		FACTEUR MULTIPLICATEUR	Pente des talus équivalente (1 : z) EXEMPLE Profondeur générale du cours d'eau (m)		
			1,2	1,8	2,4
Roc solide, tourbe schiste ou morraine	Presque vertical (90°)				
Graviers anguleux compacts	1 : 0,5	3,0	1:1,08	1:1,22	1:1,29
Sols contenant plus de 35% d'argile	1 : 1	3,5	1:1,33	1:1,49	1:1,54
Sable anguleux compact Sols contenant de 10 à 35% d'argile	1 : 1,5	4,0	1:1,58	1:1,72	1:1,79
Sols contenant moins de 10% d'argile Sable rond non compact	1 : 2	$z = ((FM\ H + b - 1) - b) / 2H$ z : fruit de la pente des talus FM : facteur multiplicateur H : profondeur du cours d'eau (m) b : largeur au fond (m)			
Terre noire décomposée Argile instable	1 : 3				

* Ouverture du cours d'eau = (FM H) + b - 1 , pour $b \geqslant 1$

La présence d'une nappe phréatique nécessite des précautions supplémentaires. Dans les cas douteux, une étude de stabilité des sols est effectuée. On se réfère à la section 4.3 pour cette étude.

La pente des talus est de toute manière fonction:

- de la stabilité prévisible de ceux-ci;
- de la reprise de la végétation souhaitée;
- des considérations d'habitats pour la faune.

4.2.3.2 Largeur au fond

La largeur au fond est fonction du débit à évacuer, des vitesses maximales à respecter, de la stabilité des sols et de la conservation de la faune aquatique. Dans une section trapézoïdale, pour déterminer la largeur au fond la plus efficace hydrauliquement on peut utiliser: $b = 2y\left((\sqrt{1 + z^2}) - z\right)$ où b = largeur au fond, y = hauteur hydraulique et z = cotangente de l'angle de la pente des talus (appelé aussi fruit). Mais d'autres facteurs tels que le type de sol, la vitesse permissible et l'équipement utilisé pour la construction doivent aussi être considérés. Dans une section trapézoïdale, une largeur au fond minimum de 600 mm est généralement recommandée.

Selon Schumm, une section stable est obtenue en sol sableux en aménageant un lit large et peu profond. Sur sol argileux, le rapport largeur au fond sur hauteur d'écoulement peut être moindre.

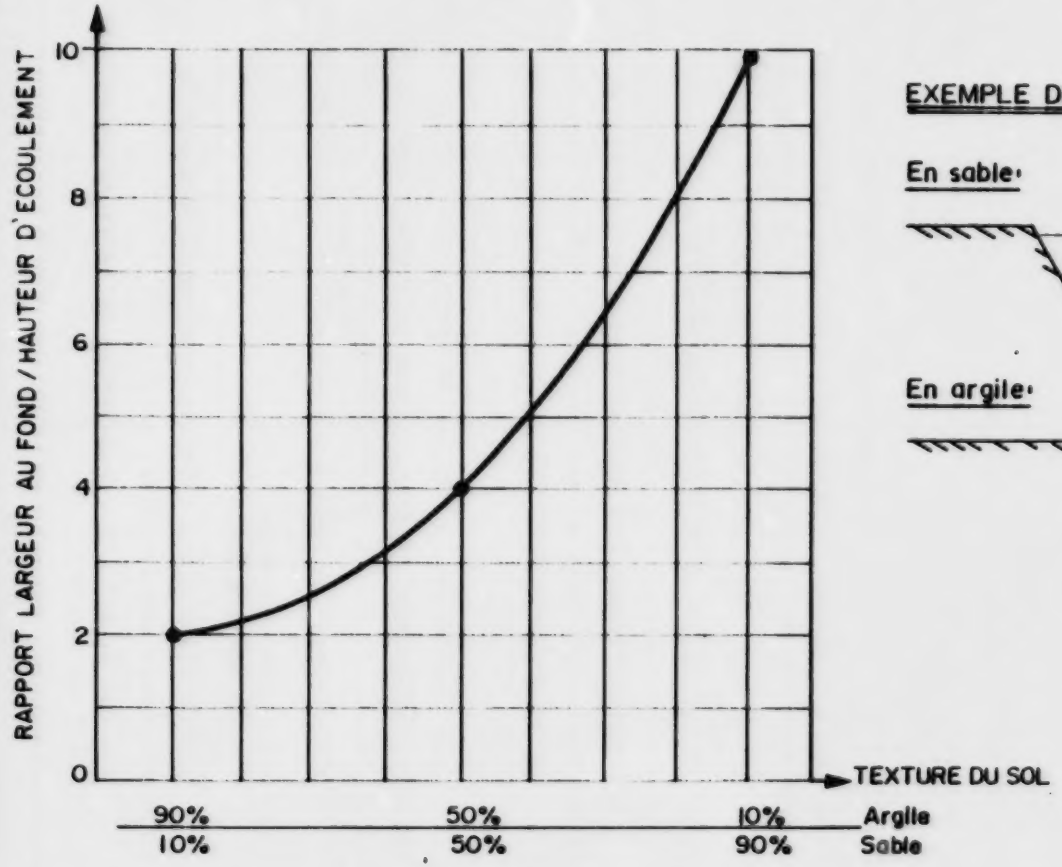
La figure 4.2 permet de déterminer le rapport **LARGEUR AU FOND / HAUTEUR D'ÉCOULEMENT** le mieux adapté à la granulométrie du lit.

La largeur au fond est fonction:

- du débit à évacuer;
- du respect des vitesses (également fonction de la pente);
- de la stabilité des sols;
- des aspects de conservation de la faune aquatique.

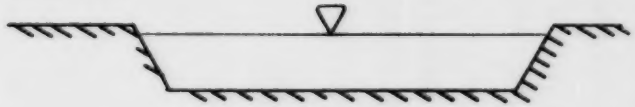
Figure 4.2

RAPPORT LARGEUR AU FOND/HAUTEUR D'ECOULEMENT (Cours d'eau naturel stable)



EXEMPLE DE SECTION STABLE

En sable:



En argile:

Source : Schumm, U.S. Dept of the Interior

4.2.3.3 Autres formes de sections

La méthode complète qui satisfait le mieux aux conditions des sols cohérents est la section parabolique de la forme $x = \sqrt{4\ H\ y}$ (voir figure 4.3); la profondeur H doit être à évaluer à chaque section de calcul.

On aura une idée sommaire des dimensions données par une section parabolique en consultant la table suivante:

SECTIONS PARABOLIQUES

	Pente générale équivalente	Pente minimale à la berge
H = 0,56 y	1 : 1,5	1 : 0,75
H = 1,00 y	1 : 2,0	1 : 1,0
H = 1,56 y	1 : 2,5	1 : 1,25
H = 2,25 y	1 : 3,0	1 : 1,50

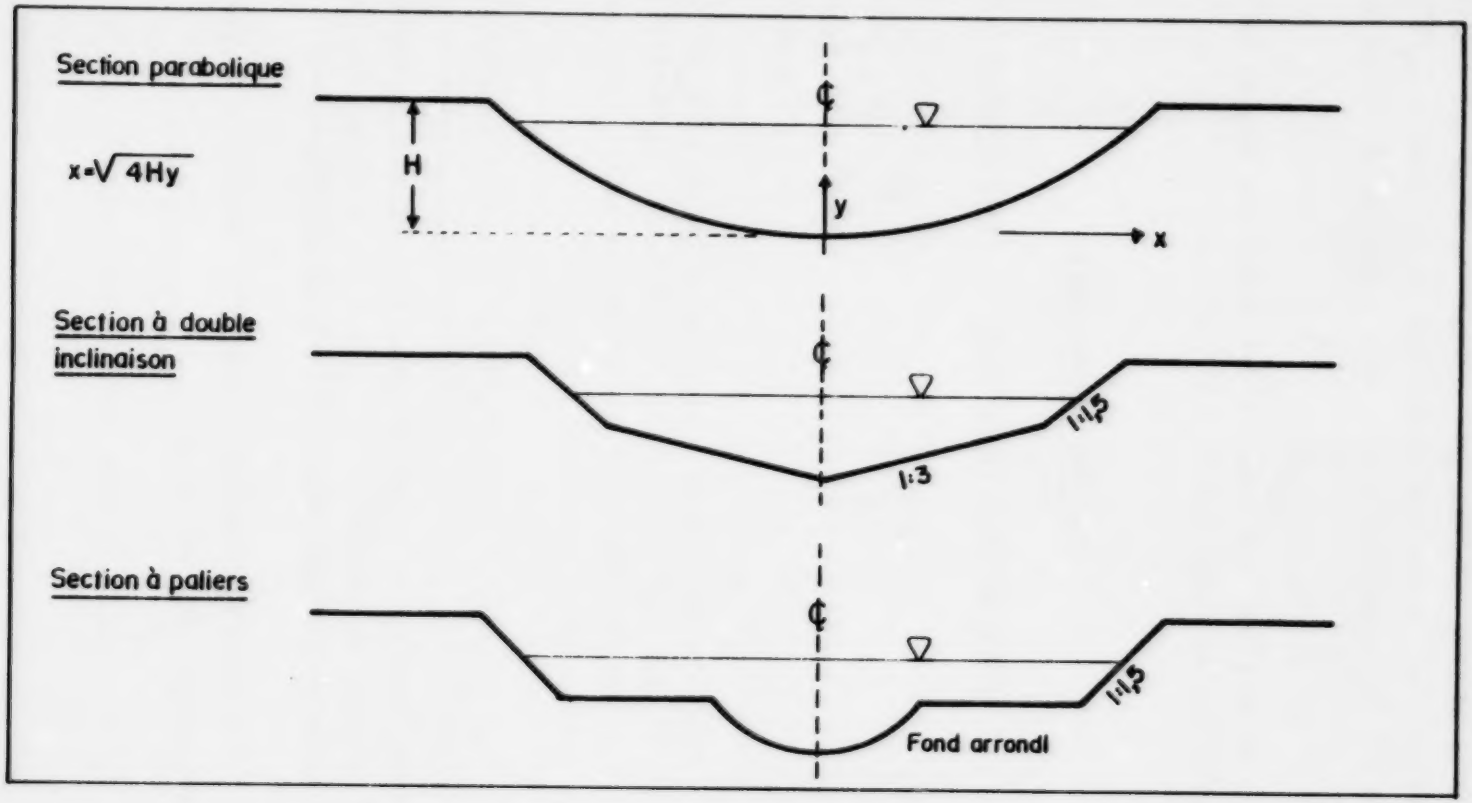
Pour des raisons de simplicité d'implantation au champ, on peut utiliser une approche linéaire, c'est-à-dire la section à double inclinaison, adaptée également dans des terrains avec un horizon inférieur plus instable (voir figure 4.3).

Les sections à paliers offrent certaines possibilités comme mesure stabilisatrice car elles facilitent l'ensemencement et permettent de diminuer l'excavation de roc solide. Avec ce type de section il est de plus possible de concentrer le filet d'eau d'étiage dans une partie limitée de la section pour favoriser la faune aquatique.

À titre d'information, l'annexe 2, section 4.7, présente les propriétés géométriques des canaux.

Figure 4.3

SECTIONS DE COURS D'EAU



4.2.4 Calculs hydrauliques

4.2.4.1 Coefficient de rugosité

Le coefficient de rugosité est de toute première importance dans le calcul de débit.

Le choix du coefficient "n" est influencé par plusieurs facteurs dont les principaux sont: le sol et la végétation composant le lit et les parois, les irrigularités dans le lit, les changements dans les sections, les obstacles, la sinuosité et la dimension du cours d'eau.

Dans la conception d'un cours d'eau sinueux, on applique un des facteurs de correction donnés ci-après au coefficient de rugosité, sélectionné au tableau 4.3.

Degré de sinuosité	Facteur de correction
faible	1,00
important	1,15
sévère	1,30

La figure 4.4 est un complément au tableau 4.3 et permet de mieux pondérer l'influence relative de la végétation sur le coefficient de rugosité.

TABLEAU 4.3
TYPES DE COURS D'EAU ET RUGOSITÉ "n"

Types de cours d'eau et description	Valeur de "n" Minimale	Moyenne	Maximale
A. EXCAVÉ OU DRAGUÉ			
a. En terre, droit et régulier			
1. Propre et récent	0,016	0,018	0,020
2. Propre, après quelques crues	0,018	0,022	0,025
3. En gravier, section uniforme, propre	0,022	0,025	0,030
4. Avec herbes courtes, un peu de mauvaises herbes	0,022	0,027	0,033
b. En terre, sinueux et paresseux			
1. Sans végétation	0,023	0,025	0,030
2. Enherbé, quelques mauvaises herbes	0,025	0,030	0,033
3. Mauvaises herbes denses et plantes aquatiques dans un canal profond	0,030	0,035	0,040
4. Lit pierreux et mauvaises herbes sur les talus	0,025	0,035	0,040
5. Lit caillouteux et talus propres	0,030	0,040	0,050
c. Excavé par une "Dragline"			
1. Sans végétation	0,025	0,028	0,033
2. Quelques broussailles sur les talus	0,035	0,050	0,060
d. Excavé dans le roc			
1. Sans aspérité et uniforme	0,025	0,035	0,040
2. Déchiqueté et irrégulier	0,035	0,040	0,050
e. Non entretenu			
1. Mauvaises herbes denses, hautes eaux	0,050	0,080	0,120
2. Lit propre, broussailleux sur les talus	0,040	0,050	0,080
3. Idem, avec hautes eaux	0,045	0,070	0,110
4. Broussailles denses, hautes eaux	0,080	0,100	0,140

TABLEAU 4.3 (suite)

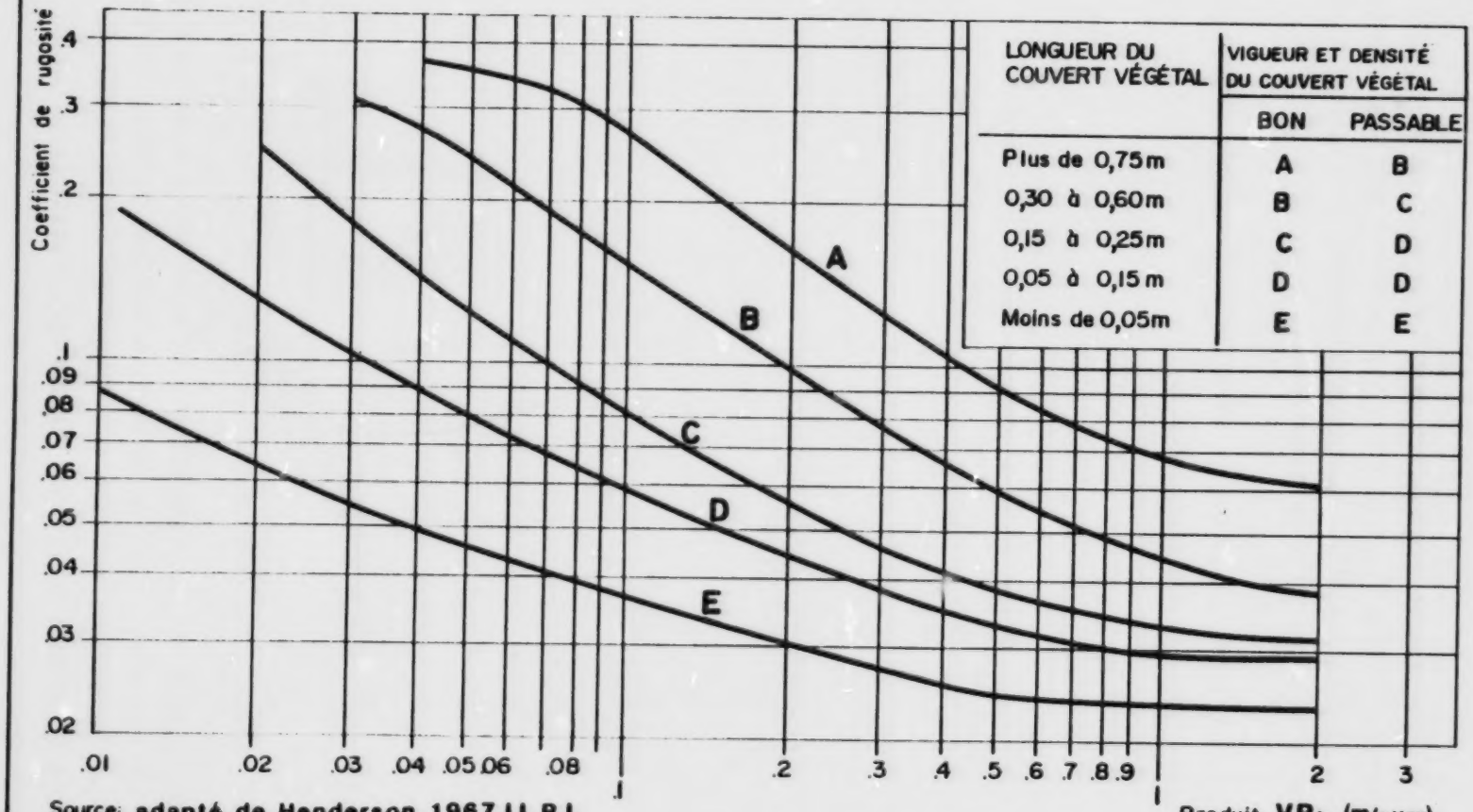
Types de cours d'eau et description	Valeur de "n" Minimale	Moyenne	Maximale
B. COURS D'EAU NATURELS			
B.1 Ayant moins de 30 m de large en période de crue			
a. Cours d'eau dans une plaine			
1. Propre, droit, sans cuvette, section pleine	0,025	0,030	0,033
2. Idem, mais avec plus de pierres et de mauvaises herbes	0,030	0,035	0,040
3. Propre, sinueux, avec quelques cuvettes et bandes de sable	0,033	0,040	0,045
4. Idem, mais avec quelques pierres et mauvaises herbes	0,035	0,045	0,050
5. Idem, basses eaux, sections et pente moins efficaces	0,040	0,048	0,055
6. Idem que (4) mais plus pierreux	0,045	0,050	0,060
7. Paresseux, cuvettes profondes, mauvaises herbes	0,050	0,070	0,080
8. Beaucoup de mauvaises herbes, cuvettes profondes ou section inondée avec une grande partie occupée par des broussailles ou des débris	0,075	0,100	0,150
b. Cours d'eau de montagne, sans végétation dans le cours d'eau, berges abruptes, recouvertes de broussailles et d'arbres et inondées en période de hautes eaux			
1. Lit: graviers, cailloux et quelques grosses pierres	0,030	0,040	0,050
2. Lit: cailloux et d'énormes pierres	0,040	0,050	0,070

TABLEAU 4.3 (suite)

Types de cours d'eau et description	Valeur de "n" Minimale	Moyenne	Maximale
B.2 Cours d'eau en plaine d'inondation			
a. Pâturage, sans broussailles			
1. Herbes courtes	0,025	0,030	0,035
2. Herbes longues	0,030	0,035	0,050
b. Surfaces cultivées			
1. Sans culture (sol nu)	0,020	0,030	0,040
2. Culture sarclée mature	0,025	0,035	0,045
3. Culture de plein champ, mature	0,030	0,040	0,050
c. Broussailles			
1. Broussailles éparses et grandes mauvaises herbes	0,035	0,050	0,070
2. Un peu de broussailles, arbres, en saison morte	0,035	0,050	0,060
3. Idem, mais en été	0,040	0,060	0,080
4. Broussailles de moyennes à denses, en saison morte	0,045	0,070	0,110
5. Idem, mais en été	0,070	0,100	0,160
d. Arbres			
1. Saules denses, cours d'eau droit, en été	0,110	0,150	0,200
2. Sol déboisé, souches d'arbres sans repousses	0,030	0,040	0,050
3. Idem, mais avec une forte croissance	0,050	0,060	0,080
4. Idem, mais avec quelques arbres renversés, sous-bois clairsemé, niveau de l'eau sous les branches	0,080	0,100	0,120
5. Idem, mais où le niveau d'eau atteint les branches	0,100	0,120	0,160

Figure 4.4

VARIATION DE LA RUGOSITÉ EN FONCTION DU COUVERT VÉGÉTAL



LONGUEUR DU COUVERT VÉGÉTAL	VIGUEUR ET DENSITÉ DU COUVERT VÉGÉTAL	
	BON	PASSABLE
Plus de 0,75 m	A	B
0,30 à 0,60 m	B	C
0,15 à 0,25 m	C	D
0,05 à 0,15 m	D	D
Moins de 0,05 m	E	E

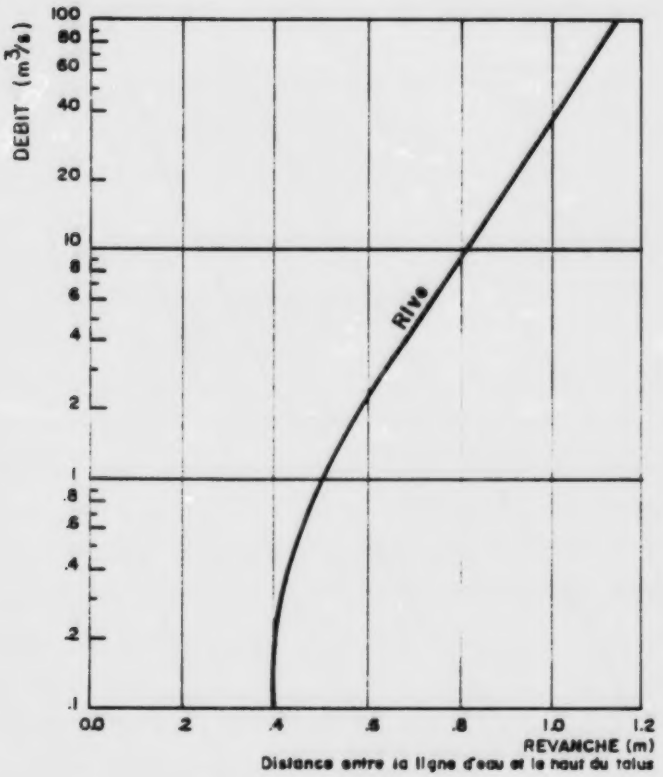
Source: adapté de Henderson 1967, I.L.R.I.

4.2.4.2 Hauteur hydraulique maximale

La hauteur hydraulique maximale doit être plus faible que la profondeur minimale du cours d'eau (non encaissé dans une coulée) dans le tronçon étudié. La différence entre la hauteur hydraulique et le sommet des talus du cours d'eau se nomme "revanche".

À titre de guide, la relation du graphique suivant peut être utilisée, dans les terrains plats.

Figure 4.5
ÉVALUATION DE LA REVANCHE (En terrain plat)



Source: I.L.R.I., Vol. IV 1980

Dans des cas spécifiques, tels les cours d'eau encaissés (pentes transversales fortes du terrain) en milieux boisés ou marécageux, la hauteur hydraulique maximale est déterminée par le niveau que peut atteindre l'eau sans occasionner de dommages importants.

4.2.4.3 Vitesse d'écoulement

La vitesse d'écoulement peut être calculée en utilisant la formule de Manning. Cette formule permet de déterminer la vitesse moyenne d'un écoulement uniforme à surface libre. Elle définit le coefficient Ch de la formule de Chézy $V = Ch\sqrt{R_h S}$ comme étant:

$$Ch = \frac{1}{n} R_h^{1/6}$$

d'où la formule de Manning:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

- V : vitesse moyenne d'écoulement de l'eau (m/s)
- n : coefficient de rugosité du lit et des parois
- S : pente de la ligne d'énergie (en écoulement uniforme cette pente est égale à la pente du fond du cours d'eau) (m/m)
- R_h : rayon hydraulique (m) = A/P
  - A : aire de la section d'écoulement (m^2)
  - P : périmètre mouillé (m)

Le débit permis par la section sera ainsi obtenu par la relation de continuité:

$$Q = VA$$

- Q : débit (m^3/s)
- V : vitesse moyenne d'écoulement de l'eau (m/s)
- A : aire de la section d'écoulement (m^2)

4.2.4.4 Vitesse maximale

Suite à l'observation et à l'expérience, Fortier et Scobey (1926) ont évalué, pour différents types de sol, les vitesses au-delà desquelles les cours d'eau risquent de s'éroder. Fortier et Scobey considèrent deux situations, l'une où l'on désire une eau claire sans sédiment et l'autre où l'on tolère que l'eau puisse transporter un peu de matériaux érodés. En pratique on utilise la vitesse maximale pour une eau avec colloïdes en suspension. Il est à noter que ces vitesses sont valables pour un cours d'eau bien établi. Si la vitesse d'écoulement est près de la limite proposée, il faut prévoir des mesures protectrices immédiatement après la construction, telles que l'ensemencement des talus.

D'autre part, l'aménagement d'une section au fond plus large ou de seuils à intervalles réguliers permet de diminuer les vitesses pour les rendre acceptables.

Selon Schwab et al. (1981), lorsque la hauteur hydraulique dépasse 0,9 mètre, les vitesses maximales du tableau 4.4 devraient être augmentées de 0,15 m/s et lorsque le parcours du cours d'eau est très sinueux, les vitesses maximales permises devraient être réduites d'environ 25%.

Si la vitesse d'écoulement maximale ne peut être respectée, le cours d'eau doit être protégé en recouvrant le périmètre mouillé de matériaux pouvant résister aux vitesses rencontrées. Les vitesses maximales sont fonction de la nature du lit du sol. À la section 4.3, nous revenons sur cette notion en fonction de la classification des sols.

TABLEAU 4.4

VITESSES MAXIMALES RECOMMANDÉES PAR FORTIER ET SCOBEY ET FORCES TRACTRICES CRITIQUES CORRESPONDANTES PROPOSÉES PAR LE U.S.BUREAU OF RECLAMATION

Nature du lit	n	Eau claire		Eau avec colloïdes en suspension	
		vitesse (m/s)	force tractrice (Pa)	vitesse (m/s)	force tractrice (Pa)
Sable fin cohérent	0,020	0,45	1,29	0,76	3,59
Loam sableux pulvérulent	0,020	0,53	1,77	0,76	3,59
Loam limoneux pulvérulent	0,020	0,61	2,30	0,91	5,27
Limons alluvionnaires pulvérulents	0,020	0,61	2,30	1,07	7,18
Loam ferme	0,020	0,76	3,59	1,07	7,18
Cendres volcaniques	0,020	0,76	3,59	1,07	7,18
Argile dure, très cohérente	0,025	1,14	12,45	1,53	22,02
Limons alluvionnaires cohérents	0,025	1,14	12,45	1,53	22,02
Schistes argileux et sols compacts	0,025	1,83	32,08	1,83	32,08
Gravier fin	0,020	0,76	3,59	1,53	15,32
Loam pierreux pulvérulent	0,030	1,14	18,19	1,53	31,60
Loam pierreux cohérent	0,030	1,22	20,59	1,68	38,30
Gravier grossier	0,025	1,22	14,36	1,83	32,08
Cailloux et galets	0,035	1,53	43,57	1,68	52,67

(CANAUX DROITS À PENTES FAIBLES CREUSÉS DEPUIS QUELQUES ANNÉES)

Source: Open-channel hydraulics, Chow, 1959.

4.2.4.5 Force tractrice critique

La force tractrice critique ou force d'arrachement permise représente la force à partir de laquelle les matériaux constituant le lit du cours d'eau commencent à se déplacer.

Le tableau 4.4 présente les forces tractrices critiques évaluées par le "U.S. Bureau of Reclamation" en fonction de la nature du lit.

La conception d'un projet de cours d'eau par la méthode de la force tractrice est présentée à la section 4.3.

4.2.4.6 Rayon de courbure

Le tableau 4.5 indique les rayons de courbure minimaux à prévoir dans les courbes en fonction du débit.

Afin que la vitesse du courant n'affecte pas la stabilité du cours d'eau dans les courbes, on évitera les rayons plus faibles que ceux donnés ci-après.

TABLEAU 4.5

RAYON DE COURBURE MINIMAL

CAPACITÉ D'ÉVACUATION (m^3/s)	RAYON MINIMAL*
jusqu'à 10	3 fois la largeur au fond
10 à 14	4 fois la largeur au fond
14 à 17	5 fois la largeur au fond
17 à 20	6 fois la largeur au fond
20 et plus	7 fois la largeur au fond

* Valable dans un matériel stable; empierrement nécessaire avec un rayon de courbure inférieur à ces valeurs.

4.2.4.7 Méandres

Les méandres se manifestent en terrain plat situé juste à l'aval d'une pente plus prononcée.

Les méandres servent à dissiper naturellement l'énergie de l'écoulement. Le méandrement peut prendre différents cheminements en fonction du temps et de l'amplitude des crues.

Tout redressement des méandres diminue la longueur d'écoulement et accentue la pente du tronçon travaillé. L'énergie qui était dissipée par les méandres est donc conservée et peut causer des dommages au lit du cours d'eau nouvellement creusé ou plus en aval.

Comme les méandres se produisent la plupart du temps en sol facilement érodable, le surplus d'énergie peut entraîner l'instabilité du fond ou des talus, un nouveau méandrement ou l'élargissement localisé du lit du cours d'eau.

Comme ces réactions sont imprévisibles, il faut stabiliser le nouveau lit au moyen d'enrochement dans les zones les plus sensibles à l'érosion et prévoir des seuils dissipateurs d'énergie pour rétablir la pente de la ligne d'énergie originale.

Suite à l'observation de cours d'eau stables, on remarque que leur sinuosité se situe entre les rapports 1,5 et 2,0; c'est-à-dire que la longueur réelle parcourue par l'eau est de une fois et demie à deux fois plus longue que la longueur d'un canal redressé qui relierait les deux extrémités du tronçon.

$$\text{SINUOSITÉ} = \frac{\text{Longueur réelle méandrée}}{\text{Cheminement le plus court}}$$

La longueur d'onde d'un méandre stable est de 7 à 11 fois la largeur du canal et l'amplitude du méandre est de 10 à 20 fois la largeur du canal. Le rayon de courbure d'un méandre est de 2 à 3 fois la largeur du canal.

Ces dernières remarques nous renseignent sur la géométrie adoptée naturellement par des méandres. Il faut vérifier ces données lorsqu'on modifie un cheminement en méandres afin d'obtenir un tracé aussi stable que possible.

4.2.5 Calcul de la courbe de remous

La méthodologie de calcul du débit est expliquée précédemment en rapport au type d'écoulement uniforme. On sait que dans plusieurs circonstances la hauteur hydraulique varie et l'écoulement est ainsi non-uniforme (voir 4.1.2).

Il faut alors procéder par calcul de la courbe de remous pour connaître la hauteur hydraulique réelle à chaque point le long du profil.

L'équation du bilan d'énergie, sous sa forme dérivée $\frac{\Delta E}{\Delta L}$, s'écrit comme suit:

$$-\frac{\Delta E}{\Delta L} = -\frac{d}{dL}\left(\frac{V^2}{2g} + Z_o - S_o L + y\right) = \left(\frac{n Q}{A R_h^{2/3}}\right)^2 = S$$

La forme intégrale s'écrit comme suit:

$$\Delta L = \int_{y_1}^{y_2} \frac{1 - \dfrac{Q^2 \ell}{g A^3}}{S_o - \left(\dfrac{n Q}{A R_h^{2/3}} \right)^2} \, dy$$

V : vitesse moyenne de l'eau (m/s)
g : constante gravitationnelle (9,8 m/s^2)
ΔL : distance entre les points 1 et 2 (m)
S : pente de la ligne d'énergie $= -\dfrac{\Delta E}{\Delta L} = \left(\dfrac{n Q}{A R_h^{2/3}} \right)^2$ (m/m)
S_o : pente du fond du cours d'eau (m/m)
y_1 : hauteur hydraulique au point 1 (m)
y_2 : hauteur hydraulique au point 2 (m)
Z_o : élévation du fond au départ de l'intervalle calculé (m)
Q : débit circulant du point 2 au point 1 (m^3/s)
A : aire de la veine liquide (m^2)
ℓ : largeur au miroir = A/y (m)
n : coefficient de rugosité
R_h : rayon hydraulique (m)

Cette forme est l'équivalent du calcul par itérations successives de la **"standard step method"**. Dans l'intégrale, le terme:

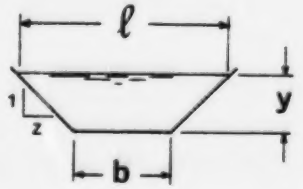
$$(Q^2 \ell \ / \ g A^3)$$

correspond au nombre de Froude au carré.

Pour les fins du présent document, l'écoulement non-uniforme dans un cours d'eau est, sauf en de très rares exceptions, fluvial. C'est la raison pour laquelle le calcul s'effectue de l'aval vers l'amont. Le résultat du numérateur dans l'intégrale est donc positif et l'équation n'est pas précise lorsque ce résultat approche 0, c'est-à-dire en écoulement presque critique.

Quant au terme $\left(\frac{n\,Q}{A\,R_h^{2/3}}\right)^2$, on reconnait la pente de la ligne d'énergie (S). L'équation n'est donc pas utile dans le cas d'un écoulement uniforme, c'est-à-dire lorsque $S = S_o$.

La première étape consiste à sélectionner les sections qui semblent les plus restrictives à l'écoulement prises lors de l'arpentage: on peut soit donner les propriétés physiques correspondantes (ℓ,A,R_h) pour plusieurs niveaux d'eau, lorsqu'on veut évaluer l'importance des obstacles à l'écoulement, soit simplement utiliser les données de design lorsqu'on veut analyser l'écoulement après travaux, c'est-à-dire:



Aire de la veine liquide:		$A = by + zy^2$
Périmètre mouillé	:	$P = b + 2y\sqrt{z^2+1}$
Rayon hydraulique	:	$R_h = A / P$
Largeur au miroir	:	$\ell = b + 2zy$

Il est avantageux de garder n et S_o constant pour un même segment de calcul car l'intégrale reste une fonction de y seulement.

Quant à la variable y, elle agit sur les valeurs de ℓ, A et R_h contenues dans l'intégrale entre les limites y_1 et y_2.

La valeur de y_1 est connue au départ pour le premier segment de calcul, tandis que y_2 est établi arbitrairement. La solution de l'intégrale donne une valeur de ΔL (négative pour les courbes de remous de type H_2 et M_2 et positive pour M_1). Cette valeur de ΔL doit correspondre après essais successifs à la longueur réelle connue entre les sections de calcul 1 et 2.

On recommence le même procédé pour le segment suivant en prenant pour y_1, la dernière valeur y_2 trouvée correcte.

4.3 STABILITÉ MÉCANIQUE DES SOLS

Tel que mentionné dans la partie 4.2.3, plusieurs situations doivent conduire à une étude plus complète de la stabilité du cours d'eau.

C'est particulièrement le cas si des instabilités sont déjà remarquées avant l'aménagement du cours d'eau, si le cours d'eau est situé dans un sol pulvérulent ou encore s'il doit être aménagé à des profondeurs importantes, par exemple supérieures à 2,50 mètres.

Les informations les plus pertinentes dans l'étude de la stabilité d'un cours d'eau touchent aux caractéristiques physiques et aux propriétés mécaniques des sols.

4.3.1 Caractéristiques physiques des sols

L'expérience a démontré que les sols peuvent être divisés en deux grandes classes d'après leur comportement mécanique, soit:

1 - sols pulvérulents* : sols dépourvus de cohésion;
2 - sols cohérents ** : sols dont les parties ont des liens entre elles (ayant de la cohésion).

* "Sols pulvérulents" est l'expression exacte dans la littérature technique et la pratique française. Les expressions "sols granulaires" et "sols non cohésifs" sont à proscrire et proviennent de la traduction littérale des termes anglais "granular soils" et "noncohesive soils".

** "Sols cohérents" est l'expression exacte en français. L'expression "sols cohésifs" traduction littérale du terme "cohesive soils" est à proscrire.

Les caractéristiques physiques d'un sol peuvent être évaluées à bien des niveaux, en fonction du type de projet. Dans l'aménagement de cours d'eau, la stabilité de la section est le but recherché. L'évaluation des caractéristiques données ci-après n'est pas limitative, mais plutôt présentée comme base dans l'étude de stabilité.

4.3.1.1 Granulométrie

La granulométrie d'un sol requiert un essai en laboratoire qui est généralement peu coûteux. Cette information sert de base pour tous les matériaux, spécialement dans les sols peu cohérents. La figure 4.6 présente deux courbes granulométriques.

4.3.1.2 Limites d'Atterberg et indice de plasticité

Les limites d'Atterberg, évaluées aussi au laboratoire, sont particulièrement utiles dans la classification des sols fins. Elles permettent de déterminer l'indice de plasticité ayant une relation directe avec la stabilité d'une section.

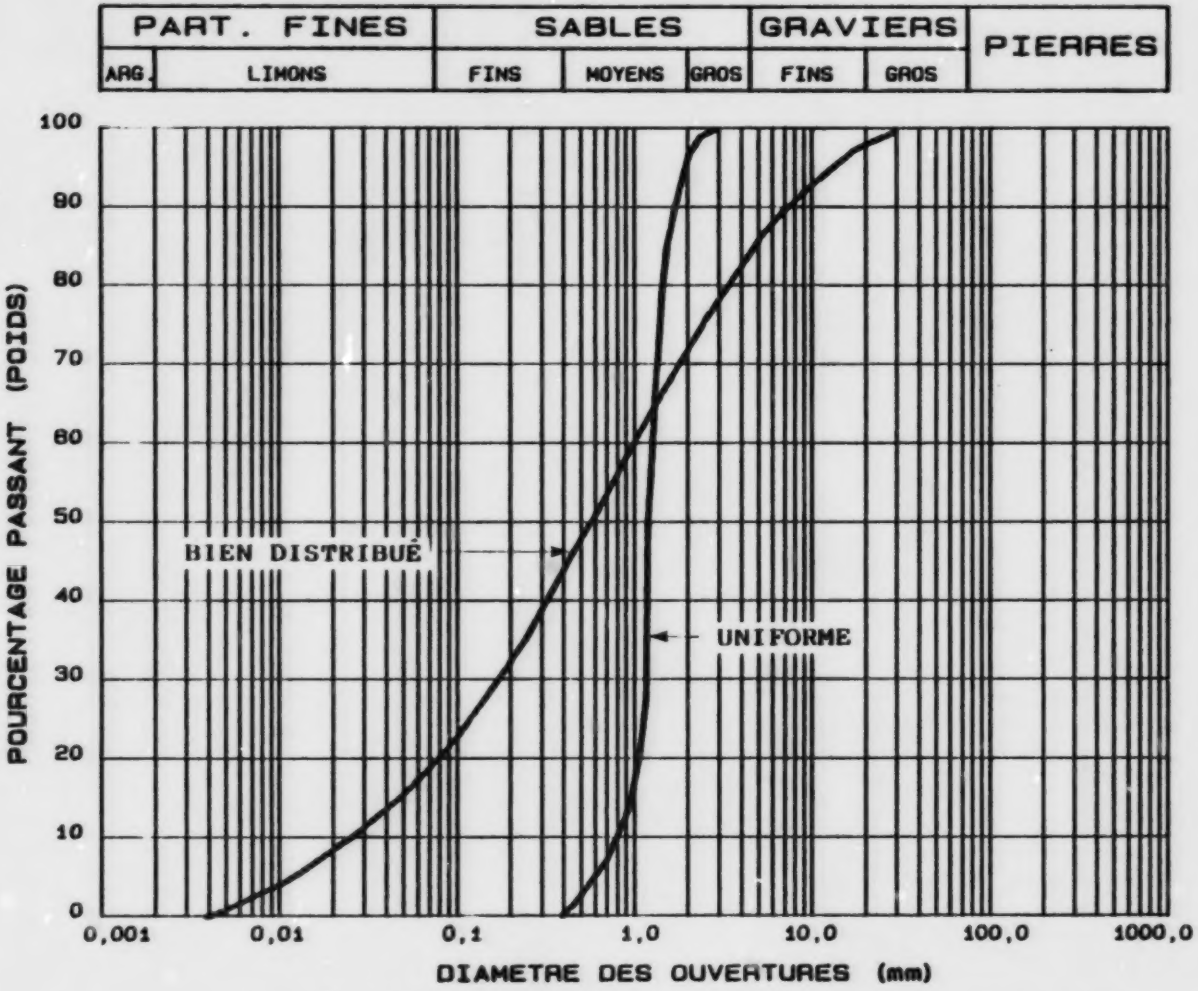
TABLEAU 4.6

LIMITES D'ATTERBERG

ÉTAT	DESCRIPTION	LIMITE = % teneur en eau
LIQUIDE	MÉLANGE VISQUEUX	
		LIQUIDE (w_L)
PLASTIQUE	PÂTE QUI SE DÉFORME SANS FISSURER	
		PLASTIQUE (w_P)
SEMI-SOLIDE	DÉFORMATION PERMANENTE ET FISSURATION	DE RETRAIT (w_R)
SOLIDE	RUPTURE SOUS LA CONTRAINTE	

Figure 4.6

COURBES GRANULOMETRIQUES



TAMIS	DIAMETRE DES OUVERTURES (mm)	
STANDARD US		MET.
4 PO^2	100	112
3 PO^2	75	80
2 1/2 PO^2	63	63
2 PO^2	50	50
1 1/2 PO^2	37,5	40
1 PO^2	25	28
3/4 PO^2	19	20
1/2 PO^2	12,5	14
3/8 PO^2	9,5	10
# 4	4,75	5
# 8	2,36	2,5
# 16	1,18	1,25
# 30	0,60	0,63
# 50	0,30	0,315
# 100	0,15	0,160
# 200	0,075	0,080

#: NUMERO DE TAMIS. NOMBRE D'OUVERTURES AU POUCE LINEAIRE.

Par exemple l'indice de plasticité employé fréquemment à cause de sa simplicité et de sa relation visuelle au champ est l'écart entre la limite liquide et la limite plastique.

$$I_p = w_L - w_P$$

I_p : indice de plasticité (%)
w_L : limite liquide (%)
w_P : limite plastique (%)

TABLEAU 4.7

PLASTICITÉ

	ÉTAT	INDICE DE PLASTICITÉ	RÉSISTANCE À SEC	TEST DE CHAMP
Peu	NON PLASTIQUE	0 - 3	TRÈS FAIBLE	SE DÉFAIT FACILEMENT
stable	PEU PLASTIQUE	4 - 15	FAIBLE	FACILE À ÉCRASER AVEC LES DOIGTS
↕	PLASTIQUE	16 - 30	MOYENNE	DIFFICILE À ÉCRASER AVEC LES DOIGTS
Stable	TRÈS PLASTIQUE	31 ET +	ÉLEVÉE	IMPOSSIBLE À ÉCRASER AVEC LES DOIGTS

Les limites d'Atterberg indiquent en fait la capacité des sols argileux à absorber l'eau et à se maintenir stable physiquement.

4.3.1.3 Classification

Les informations obtenues précédemment permettent de classifier les sols suivant la méthode unifiée selon leurs propriétés physiques. Le tableau 4.8 présente la classification des sols (ASTM D 248T-66T).

TABLEAU 4.8
CLASSIFICATION DES SOLS

GRANDS GROUPES		GROUPE DE SOL	STABILITE	CLASSIFICATION EN LABORATOIRE		DESCRIPTION DU SOL
				% PLUS FIN QUE TAMIS # 200	CRITÈRES ADDITIONNELS	
GROSSIERS (plus de 50% en poids retenu sur le tamis # 200)	GRAVELEUX (plus de 50% retenu sur le tamis # 4)	GW	A	0 - 5	$\frac{d_{60}}{d_{10}} > 4$	Gravier bien distribué
		GP	B	0 - 5	$1 < \frac{d_{30}^2}{d_{60}\, d_{10}} > 3$	Gravier uniforme
		GM	B	12 et plus	$I_p < 4$	Gravier silteux-sableux
		GC		12 et plus	$I_p > 7$	Gravier argileux-sableux
	SABLEUX (plus de 50% passant le tamis # 4)	SW	A	0 - 5	$\frac{d_{60}}{d_{10}} > 4$	Sable bien distribué
		SP	B	0 - 5	$1 < \frac{d_{30}^2}{d_{60}\, d_{10}} > 3$	Sable uniforme
		SM	C	12 et plus	$I_p < 4$	Sable silteux
		SC	B	12 et plus	$I_p > 7$	Sable argileux
FINS (plus de 50% en poids passant le tamis # 200)	PEU COMPRESSIBLE (limite liquide inférieure à 50%)	ML	D	Charte de plasticité		Silt, sable très fin, sable fin silteux-argileux, silt argileux
		CL	B	Charte de plasticité		Argile peu plastique sableuse ou silteuse
		OL	E	Charte de plasticité, odeur et couleur de matière organique		Silt organique et argile organique peu plastiques
	TRÈS COMPRESSIBLE (limite liquide supérieure à 50%)	MH	D	Charte de plasticité		Silt, cendres volcaniques
		CH	C	Charte de plasticité		Argile très plastique et argile sableuse
		OH	E	Charte de plasticité, odeur et couleur de matière organique		Silt organique et argile organique très plastique
SOLS AVEC MATIÈRE ORGANIQUE FIBREUSE		Pt	E	Matière organique		Tourbe, tourbe sableuse et tourbe argileuse

$\frac{d_{60}}{d_{10}}$: coefficient d'uniformité

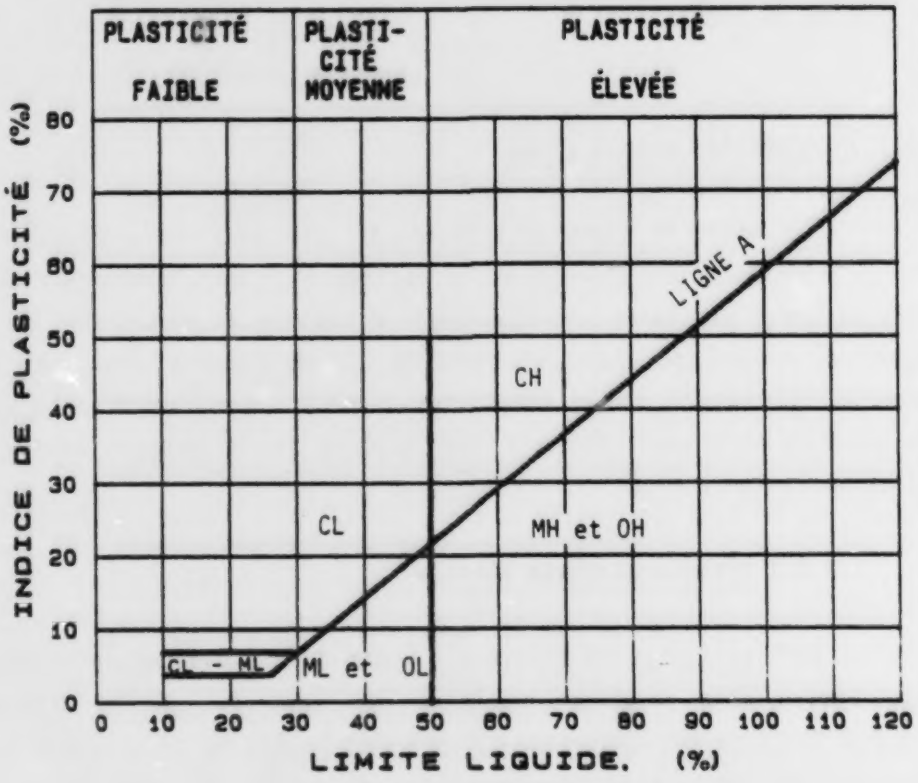
I_p : indice de plasticité

Stabilité
- A : très stable
- B : stable
- C : plus ou moins stable
- D : peu stable
- E : très peu stable

La charte de plasticité de Casagrande, présentée à la figure 4.7, permet de classer les sols à grains fins cohérents selon la classification unifiée présentée au tableau 4.8.

FIGURE 4.7

CHARTE DE PLASTICITÉ DE CASAGRANDE



4.3.1.4 Autres caractéristiques

Finalement d'autres caractéristiques du sol sont relativement faciles à obtenir par la prise d'échantillons de sol non remaniés dans un cylindre. En connaissant le volume du cylindre, et après avoir mesuré son poids humide et ensuite son poids sec, on obtiendra:

le poids volumique du sol : $\gamma_s = \frac{\text{poids humide}}{\text{volume}}$ (kN/m^3)

la teneur en eau : $w = \frac{\text{poids humide - poids sec}}{\text{poids sec}}$ (%)

l'indice de vide : $e = \frac{\text{volume de vide}}{\text{volume du solide}} = \frac{V_v}{V_s}$

4.3.2 Instabilités dues à l'eau

L'instabilité d'une section due à l'eau peut provenir de deux sources: l'écoulement de l'eau dans la section et l'écoulement de l'eau à travers la paroi des talus. L'écoulement à travers la parois des talus est causé par une nappe d'eau souterraine élevée pouvant provoquer le phénomène de boulance. Les instabilités dues à l'écoulement de l'eau dans la section sont vérifiées par les calculs de la vitesse maximale permise et de la force tractrice critique.

4.3.2.1 Vitesse maximale permise

Le tableau 4.9 et la figure 4.8 permettent d'évaluer la vitesse maximale permise dans un canal en terre non protégé. Cette vitesse maximale est fonction des matériaux constituant le lit du cours d'eau qui sont divisés en deux classes, soient: sols pulvérulents et sols cohérents. À partir du tableau 4.9 et de la figure 4.8, on calcule la vitesse maximale permise (V_m).

TABLEAU 4.9

VITESSE MAXIMALE PERMISE DANS LES CANAUX EN TERRE NON PROTÉGÉS

Matériaux constituant le cours d'eau	Vitesse maximale permise
1- Sols pulvérulents	
1-1 Écoulement chargé de sédiments	
$d_{75} > 0,4$ mm	$V_m = V_B\ A_f\ B_f\ D_f$
$d_{75} < 0,4$ mm	$V_m = 0,61$ m/s
1-2 Écoulement sans sédiments	
$d_{75} > 2,0$ mm	$V_m = V_B\ A_f\ B_f\ D_f$
$d_{75} < 2,0$ mm	$V_m = 0,61$ m/s
2- Sols cohérents	
$I_p > 10$	$V_m = V_B\ A_f\ C_f\ D_f\ F_f$
$I_p < 10$	$V_m = 0,61$ m/s

V_m : vitesse maximale permise (m/s)
V_B : vitesse de base (m/s) (Figure 4.8)
A_f : facteur de correction pour la sinuosité
B_f : facteur de correction pour la pente des talus
C_f : facteur de correction pour la densité
D_f : facteur de correction pour la hauteur d'écoulement de l'eau
F_f : facteur de correction pour la récurrence

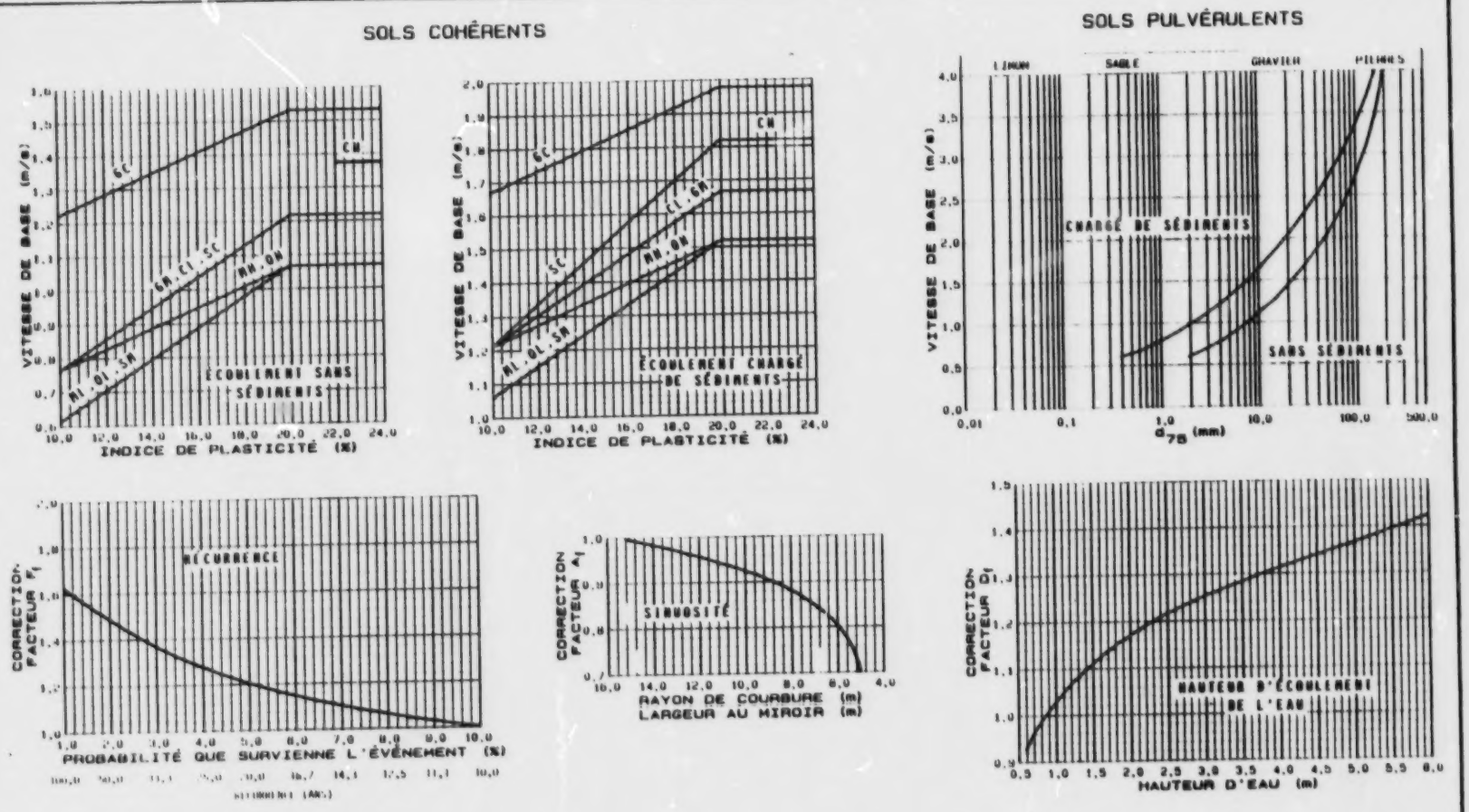


FIGURE 4.8

VITESSE DE BASE ET FACTEURS DE CORRECTION
POUR LE CALCUL DE LA VITESSE MAXIMALE PERMISE
DANS LES CANAUX EN TERRE NON PROTEGÉS
EN FONCTION DE LA CLASSIFICATION DU SOL

SOURCE: DESIGN OF OPEN CHANNELS, OCTOBRE 1977, SOIL CONSERVATION SERVICE.

4.3.2.2 Force Tractrice

4.3.2.2.1 Force tractrice maximale

La force tractrice, aussi appelée force d'arrachement, représente la poussée de l'eau sur les particules de sols formant le périmètre mouillé dans le sens de l'écoulement des eaux. Pour un écoulement uniforme dans un canal infiniment large, la force tractrice est égale au produit du poids volumique de l'eau par la section d'écoulement par la longueur de l'écoulement et par la pente du canal. Ce produit divisé par le périmètre mouillé et la longueur de l'écoulement donne la force tractrice par unité de surface mouillée qui s'exprime comme suit:

$$T = \gamma_w R_h S_o$$

T : force tractrice par unité de surface mouillée (Pa)
γ_w : poids volumique de l'eau ($\simeq 9800$ N/m^3)
R_h : rayon hydraulique (m)
S_o : pente du cours d'eau (m/m)

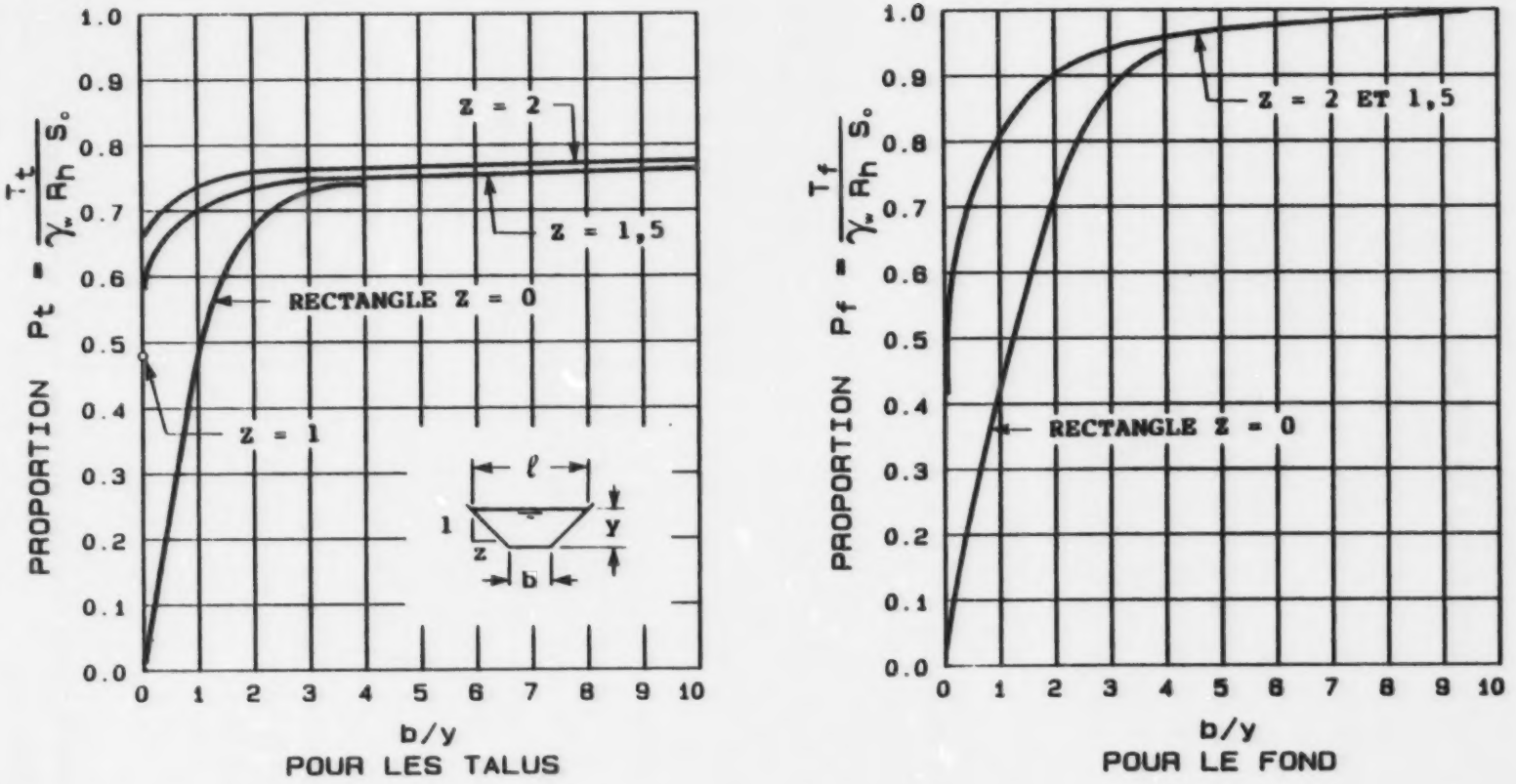
Pour un canal trapézoïdal, la force tractrice par unité de surface mouillée varie en intensité sur les talus et le fond du canal. La force tractrice maximale sur les talus a lieu près de la base et la force tractrice maximale au fond se produit au milieu de la section. Les forces tractrices maximales sont fonction de la pente des talus, de la largeur au fond et de la hauteur hydraulique. Les forces tractrices maximales s'expriment comme suit:

POUR LES TALUS: $T_t = P_t \gamma_w R_h S_o$

T_t : force tractrice maximale par unité de surface mouillée sur le talus (Pa)
P_t : proportion entre T_t et le produit $\gamma_w R_h S_o$ (Figure 4.9)

POUR LE FOND: $T_f = P_f \gamma_w R_h S_o$

T_f : force tractrice maximale par unité de surface mouillée sur le fond (Pa)
P_f : proportion entre T_f et le produit $\gamma_w R_h S_o$ (figure 4.9)



b = LARGEUR AU FOND y = HAUTEUR HYDRAULIQUE z = COTANGENTE DE L'ANGLE DE LA PENTE DU TALUS

FIGURE 4.9

PROPORTION ENTRE LA FORCE TRACTRICE MAXIMALE PAR UNITÉ DE SURFACE MOUILLÉE ET LE PRODUIT $\gamma_w R_h S_o$, POUR UNE SECTION TRAPÉZOÏDALE

SOURCE: OPEN-CHANNEL HYDRAULICS, V.T. CHOW (1959)

4.3.2.2.2 Force tractrice critique

La force tractrice critique par unité de surface mouillée représente la force à partir de laquelle les matériaux constituant le lit du cours d'eau commencent à se déplacer. La figure 4.10 présente la force tractrice critique par unité de surface mouillée (T_c) en fonction de la classe de sol composant le lit du cours d'eau. La force tractrice critique, pour une section trapézoïdale, se détermine comme suit:

1 - SOLS COHÉRENTS

- Texture du sol composant le lit.
- Indice de vide.
- On néglige les forces de gravité de sorte que T_c talus = T_c fond = T_c.

2 - SOLS PULVÉRULENTS

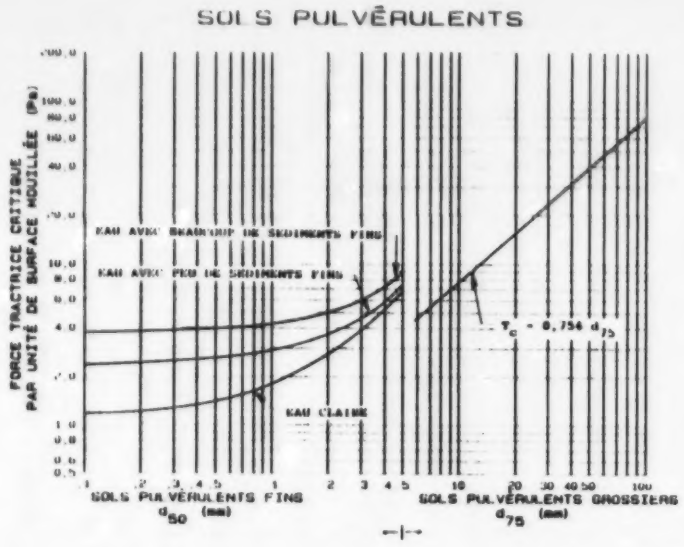
2.1 - FINS

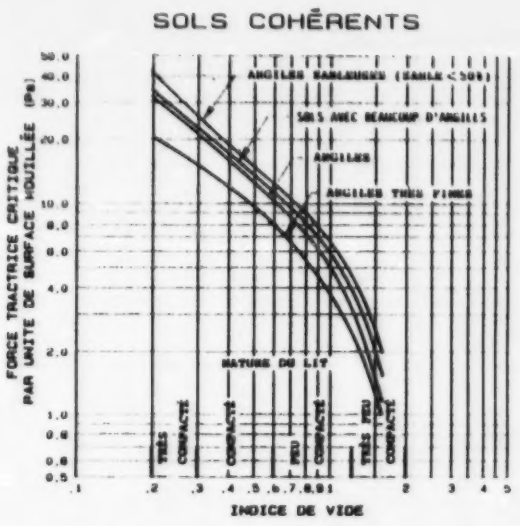
- d_{50}, diamètre correspondant à 50% passant sur la courbe granulométrique (diamètre moyen).
- Choix de la qualité de l'eau de l'écoulement (sans, peu ou beaucoup de sédiments).
- On néglige les forces de gravité de sorte que T_c talus = T_c fond = T_c.

2.2 - GROSSIERS

- d_{75}, diamètre correspondant à 75% passant sur la courbe granulométrique.
- θ , angle de repos du matériel évalué à partir du d_{75}.
- α , angle des talus.
- À partir de θ et α , détermination de K, rapport des forces tractrices entre le talus et le fond (T_c talus $\neq$ T_c fond = T_c).

$$K = \sqrt{1 - \frac{\sin^2\alpha}{\sin^2\theta}} = \frac{T_c \text{ talus}}{T_c \text{ fond}}$$





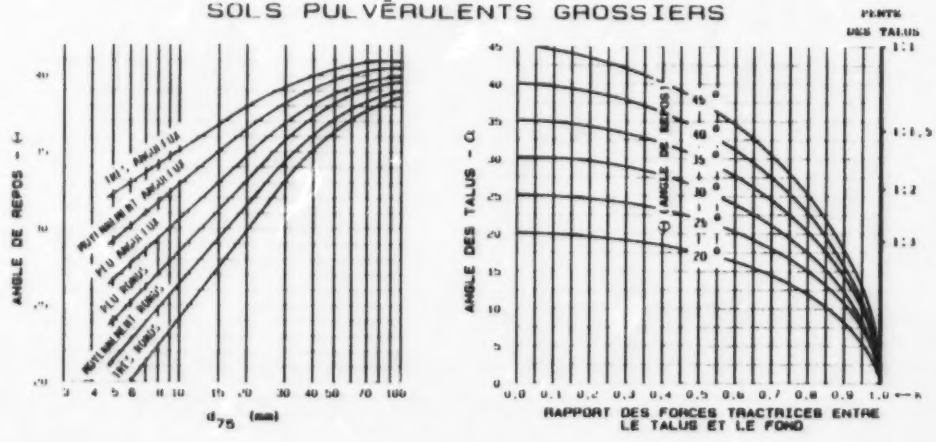


FIGURE 4.10

FORCE TRACTRICE CRITIQUE
PAR UNITÉ DE SURFACE MOUILLÉE

	FACTEUR MULTIPLICATEUR AUX FORCES TRACTRICES
COURS D'EAU DROIT	1,00
PEU DE COURBES (TERRAIN FAIBLEMENT ACCIDENTÉ)	0,80
QUANTITÉ MOYENNE DE COURBES (TERRAIN MOYENNEMENT ACCIDENTÉ)	0,75
BEAUCOUP DE COURBES (TERRAIN TRÈS ACCIDENTÉ)	0,60

SOURCE: OPEN-CHANNEL HYDRAULICS, V.T. CHOW (1959) ET MANUEL D'HYDRAULIQUE GÉNÉRALE, A. LENCASTRE (1984).

4.3.2.2.3 Méthode de la force tractrice

La conception d'un cours d'eau par la méthode de la force tractrice s'effectue comme suit:

1 - Calcul de la force tractrice maximale par unité de surface mouillée pour le talus (T_t) et le fond (T_f).

2 - Détermination de la force tractrice critique par unité de surface mouillée en fonction de la classe de sol composant le lit du cours d'eau (T_c). Pour la classe de sol pulvérulent grossier, il faut tenir compte des forces de gravité et déterminer T_c fond et T_c talus.

3 - Vérification des conditions d'acceptation:

sol cohérent ou pulvérulent fin: $T_t \leqslant T_c$ et $T_f \leqslant T_c$;

sol pulvérulent grossier: $T_t \leqslant T_c$ talus et $T_f \leqslant T_c$ fond.

4 - Si les conditions d'acceptation ne sont pas remplies, on peut soit donner de nouvelles dimensions à la section du cours d'eau en agissant sur la pente des talus ou la largeur au fond, ou soit modifier la pente du cours d'eau par l'aménagement de seuils. Ces modifications permettent de réduire les forces tractrices maximales calculées en 1. On peut également modifier la nature du lit par un enrochement pour augmenter la force tractrice critique par unité de surface mouillée déterminée en 2. Suite à ces modifications, on reprend les étapes 1, 2 et 3 jusqu'à ce que les conditions d'acceptation soient remplies.

4.3.2.3 Boulance

L'action de l'eau en suintement dans les parois du cours d'eau doit répondre également à certaines contraintes pour ne pas affecter la stabilité (voir Figure 4.11).

Pour les sols pulvérulents, la pente des talus doit être très inclinée puisque l'angle de repos de ces sols varie généralement de 30° à 40°.

Dans ces sols, il faut privilégier une section à double inclinaison ou de type parabolique (voir figure 4.3).

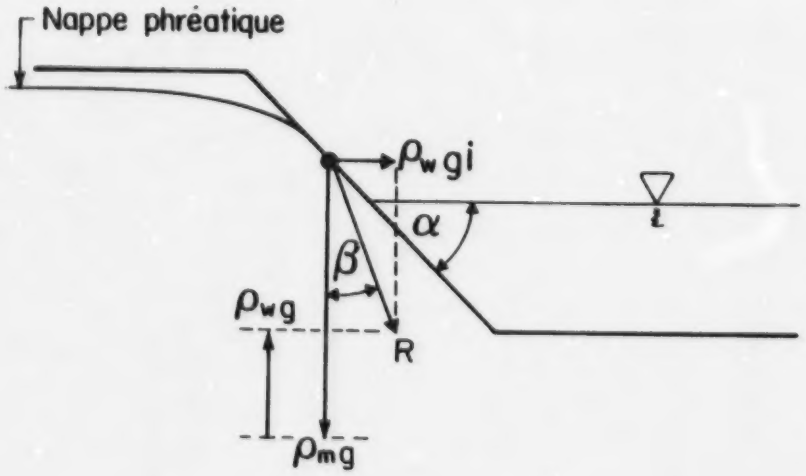
L'affleurement de la nappe se faisant habituellement dans la partie inférieure du talus, ces sections présentent des pentes de talus plus faibles dans cette zone. L'ensemencement après travaux offre une protection additionnelle importante.

Il ne faut pas oublier que la boulance se produit souvent immédiatement après les travaux d'excavation et que celle-ci peut alors être contrôlée, par exemple, en procédant par étapes à l'abaissement du profil dans un sol où la nappe est haute au départ.

La figure 4.11 indique l'équilibre des forces et la résultante découlant de la percolation de l'eau à travers le bas du talus.

Figure 4.11

BOULANCE



i : gradient hydraulique

ρ_w : masse spécifique de l'eau (kg/m^3)

ρ_m : masse spécifique du sol (kg/m^3)

α : angle du talus (°)

β : angle entre la résultante et la verticale (°)

R : résultante des forces de gravité et de pression de la nappe. (N)

Θ : angle de repos du sol (°)

$\alpha + \beta < \Theta$

β varie de 25° a 32°
(de très dense à peu dense)

g : constante gravitationnelle (m/s^2)

Source: I.L.R.I., Vol. IV, 1980

4.3.3 Propriétés mécaniques

Dans l'étude analytique de la stabilité d'une section, les paramètres à quantifier sont:

- la cohésion C (kPa);
- l'angle de friction interne ϕ (degré).

On détermine ces paramètres par des données géotechniques existantes pour la région, par des essais en laboratoire ou par un essai au champ à l'aide d'un scissomètre (voir figure 4.12).

Évidemment les essais au champ et la prise d'échantillons sont requis surtout dans les cas où des instabilités sont déjà remarquées.

4.3.4 Instabilités dues au sol

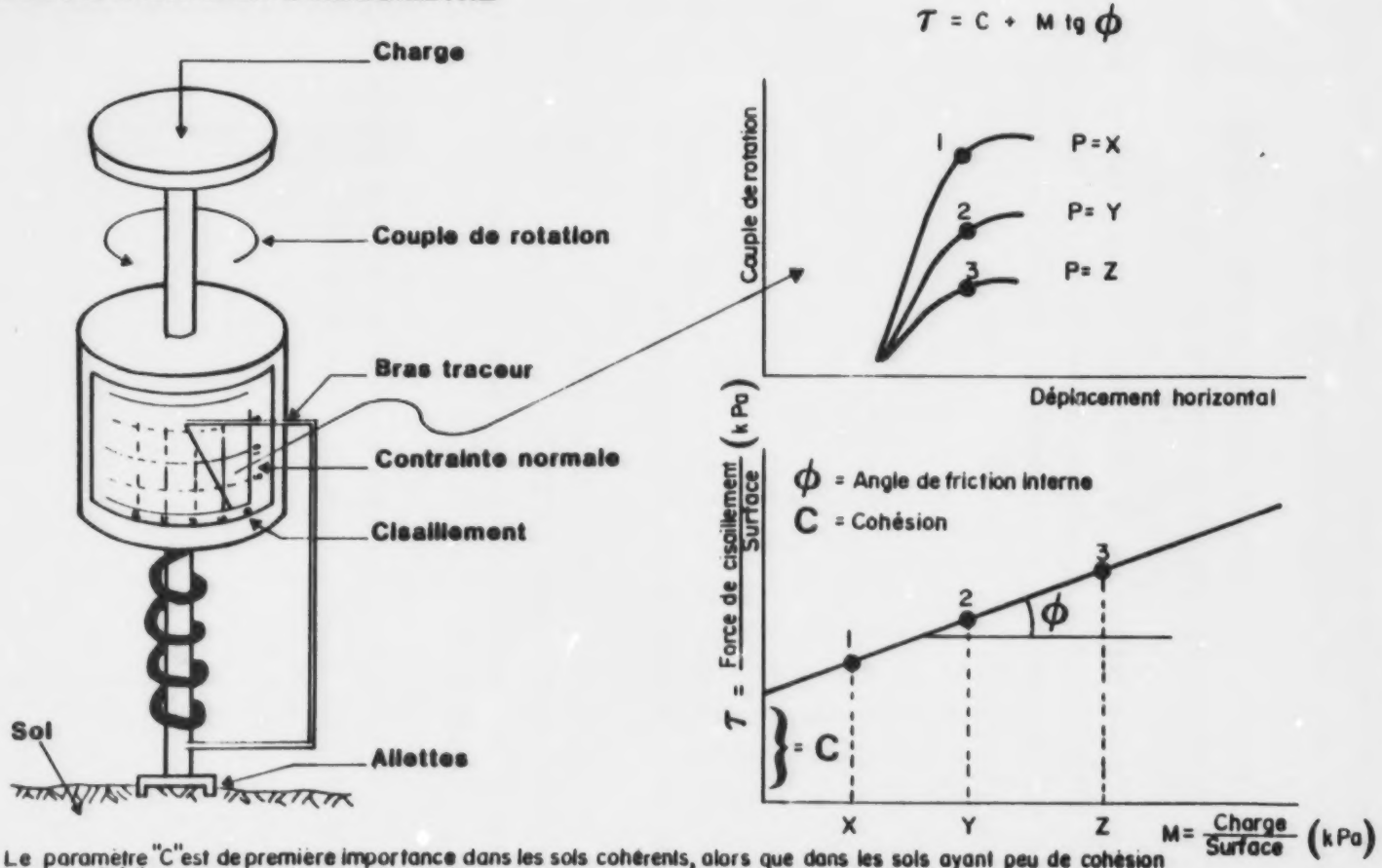
Les instabilités dues au sol sont conséquentes aux propriétés mécaniques du sol qui peuvent affecter la stabilité des talus.

Trois principaux types d'instabilité mécanique de talus sont à prévoir:

- rupture en cercle;
- bris de pied;
- bris de face.

Figure 4.12

ILLUSTRATION D'UN SCISSOMETRE



Le paramètre "C" est de première importance dans les sols cohérents, alors que dans les sols ayant peu de cohésion c'est "ϕ" qui influence les résultats.

Source : Mc Neely Engineering ltd., 1982

Le premier type et le plus grave est un glissement suivant le cercle de rupture. Il est plus rare car pour qu'il se produise, le cours d'eau doit avoir été aménagé dans une argile sensible.

On peut facilement trouver la solution analytique en connaissant la résistance de l'argile en cohésion et l'angle de friction interne.

Si la valeur de l'angle de friction interne est faible (tan Φ tend vers 0), on additionne la somme des moments résistants (basés sur la cohésion) et la somme des moments de rupture (gravité, poussée d'eau, poids) et on évalue le facteur de sécurité.

$$FS = \frac{M_r}{M_m}$$

FS : facteur de sécurité

M_r : moment résistant (kN.m/mètre d'épaisseur)

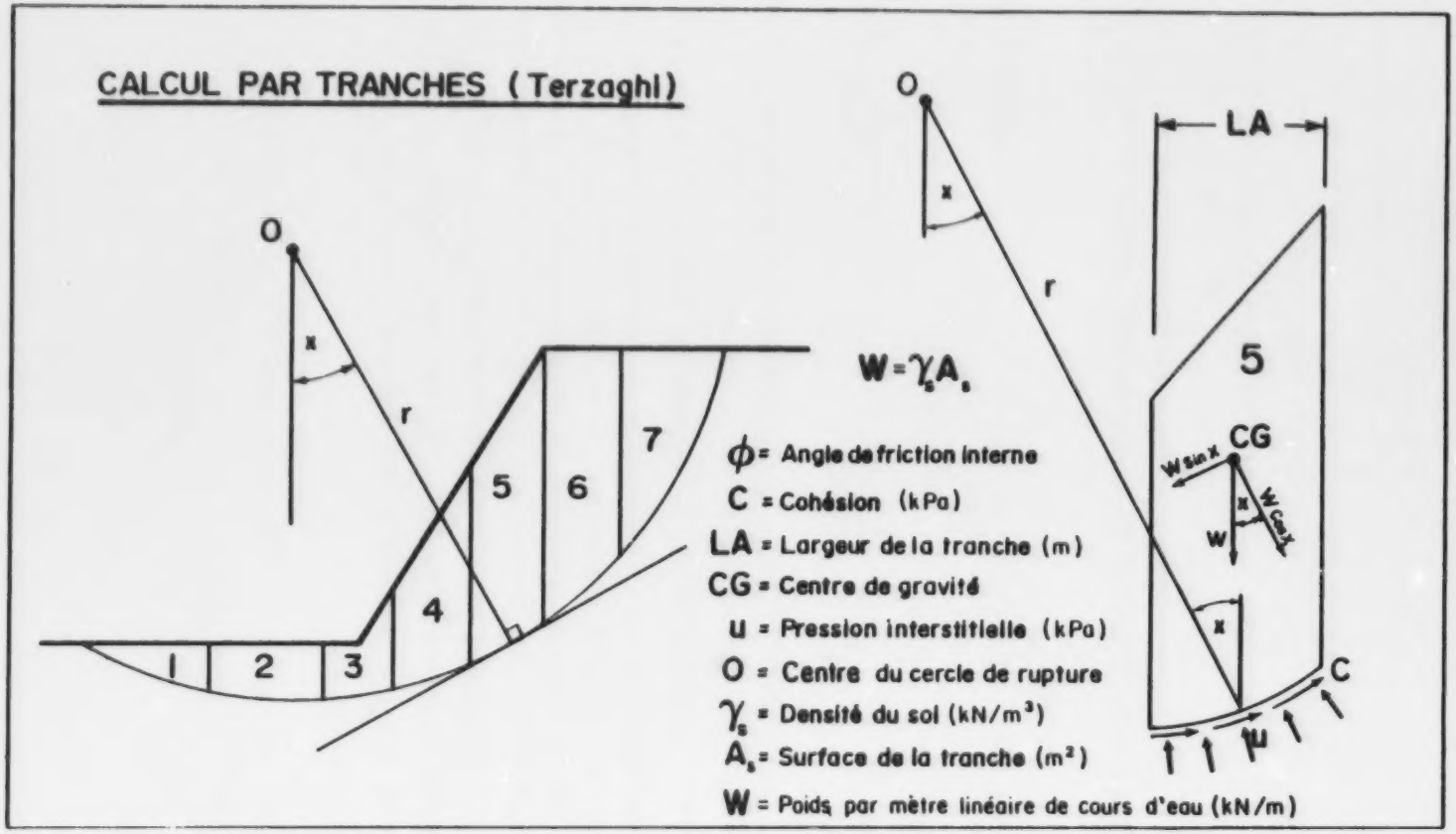
M_m : moment menant (kN.m/mètre d'épaisseur)

La solution générale toutefois est plus élaborée pour tenir compte du gradient hydraulique et de la friction. On divise le segment en rotation par tranches et on additionne les moments résistants et de ruptures (figure 4.13).

On suppose un abaissement rapide de la veine liquide et une saturation complète du talus (pire condition de calcul).

Figure 4.13

MÉTHODE DU CERCLE DE RUPTURE (SOLS COHÉRENTS)



Source: Terzaghi and Peck

Moment menant

$$M_m = (W \sin x)\, r$$

Moment résistant

$$M_r = \left[C\, LA + (W \cos x - u\, LA) \tan\phi\right] \quad r$$

On fait la sommation des moments menants et résistants pour chaque tranche puis on fait la sommation des résultats.

Le facteur de sécurité est égal à

$$FS = \frac{\text{Moment résistant}}{\text{Moment menant}}$$

$$FS = \frac{\Sigma\left[C\, LA + (W \cos x - u\, LA) \tan\phi\right]}{\Sigma(W \sin x)}$$

La définition des paramètres est donnée à la figure 4.13.

L'application de la méthode se fait par itérations successives en déplaçant le point O (centre du cercle de rupture). Lorsque le facteur de sécurité s'approche ou devient inférieur à 1, il y a alors de très grands risques de rupture et d'effondrement de talus.

Le second type d'instabilité est le bris de pied. La hauteur maximale permise est donnée dans les sols cohérents homogènes avec un angle de friction interne faible ($\phi \simeq 0°$), par la relation:

$$H = \frac{C}{m\ \gamma_s\ FS}$$

H : hauteur maximale permise (m)
C : cohésion (kPa)
m : nombre de stabilité (sans dimension) (Figures 4.14 et 4.15)
γ_s : poids volumique du sol (kN/m^3)
FS : facteur de sécurité

La hauteur déterminée par cette équation doit se voir appliquer un facteur de sécurité comme dans les autres cas.

De façon pratique, on calcule le facteur de sécurité pour une hauteur de talus donnée:

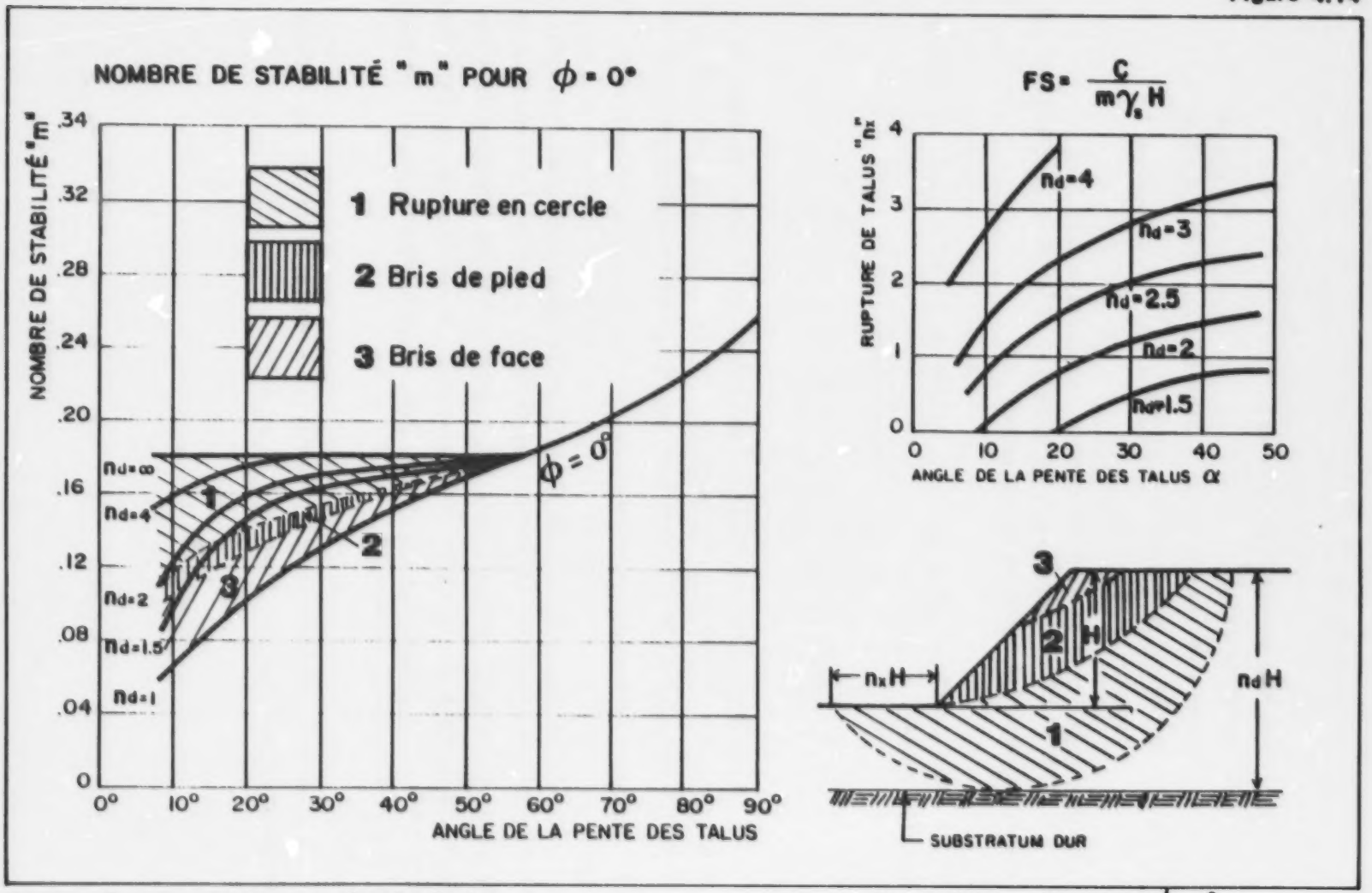
$$FS = \frac{C}{m\ \gamma_s\ H}$$

Le troisième cas est un bris de face qui se résoud par les mêmes procédés que ceux énumérés précédemment. En fait, le bris de face est déterminé par un horizon différent de sol qui fixe la hauteur de ligne de bris.

Les figures 4.14 et 4.15 permettent de calculer dans les sols cohérents argileux homogènes le facteur de sécurité à partir d'une hauteur de talus H, de la profondeur du substratum dur exprimé en fonction de H par n_d H, de l'angle de la pente des talus α , et de l'angle de friction interne ϕ . Le cas le plus critique dans les argiles molles est lorsque l'angle de friction interne $\phi = 0°$.

L'annexe 1, section 4.6.2, présente un exemple de calcul du facteur de sécurité basé sur les figures 4.14 et 4.15.

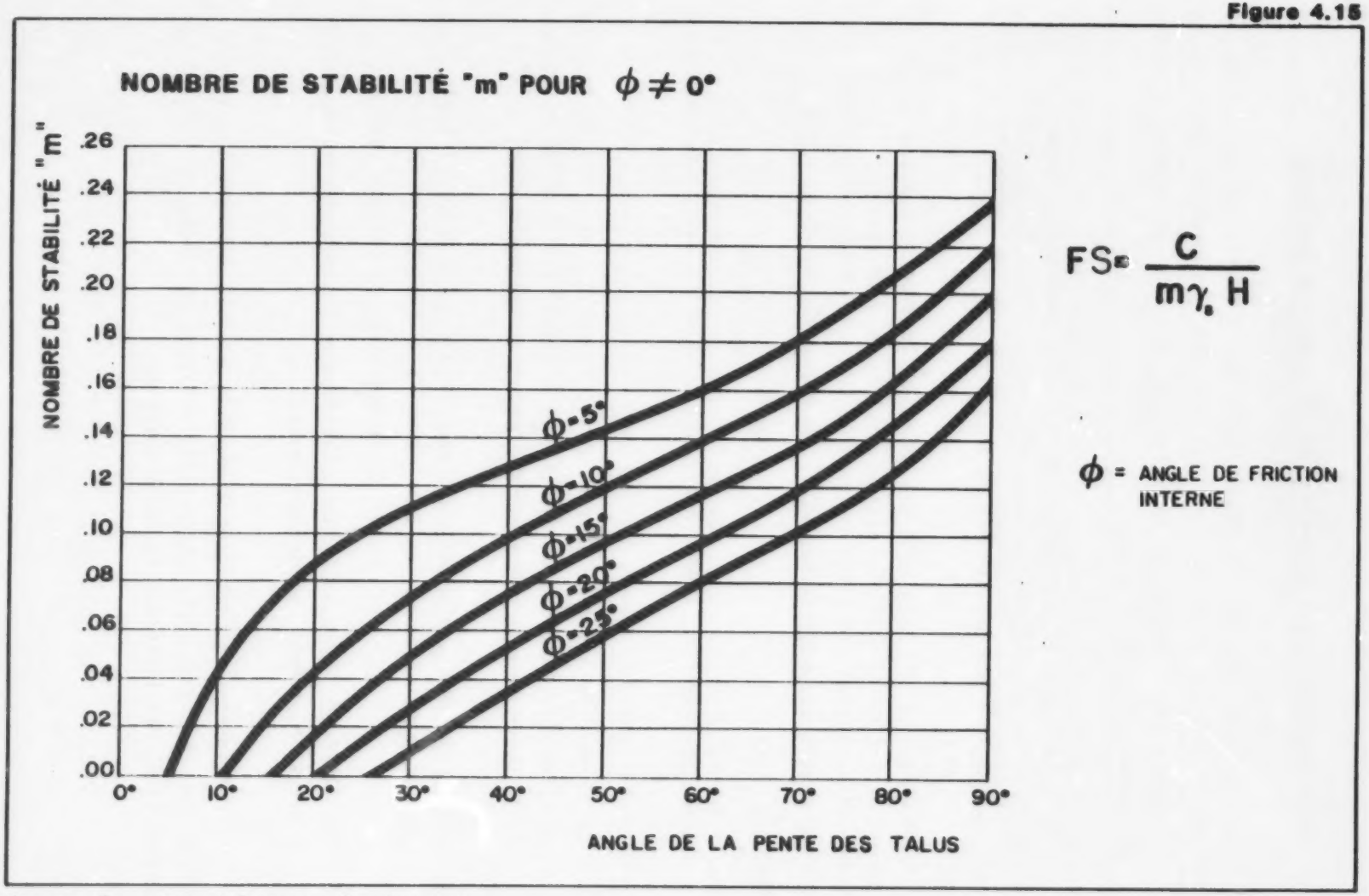
Figure 4.14



Source : Sowers and Sowers d'après Taylor

Pour sols argileux cohérents ($\phi = 0°$)

Figure 4.15



Source: Sowers and Sowers d'après Taylor

4.3.5 Considérations générales sur la stabilité des talus

La majorité des cas ne nécessitent pas d'essais coûteux comme le triaxial (C et ϕ) et il faut retenir dans un premier temps toute l'importance de l'examen de la stabilité actuelle ou naturelle avant l'aménagement d'un cours d'eau.

Aussi, les cas où l'instabilité est déjà manifeste, et où elle est susceptible de se produire, doivent être étudiés en profondeur. La plupart des cours d'eau ont atteint un état stable.

On note la pente existante des talus et le type de sol pour déterminer au départ si le matériau est pulvérulent ou cohérent.

Dans la détermination des pentes de talus, on doit toujours retenir que:

1 - Plus on augmente la profondeur, plus la pente des talus doit être faible;

2 - Le facteur de sécurité pour la pire situation ($\phi = 0°$) se calcule facilement à partir d'un minimum de données à l'aide de la figure 4.14, (Voir exemple de calcul à l'annexe 1, section 4.6.2).

3 - Les talus ensemencés et généralement secs peuvent avoir des pentes plus fortes.

4 - La pente de talus doit être plus faible le long des voies ferroviaires, routières, ou de machineries.

En conclusion, les tableaux 4.10, 4.11 et 4.12 résument les instabilités dues à l'eau, les instabilités reliées aux types de sol et les instabilités résultant des facteurs externes.

TABLEAU 4.10
INSTABILITÉS DUES À L'EAU

CAUSES	MILIEU PROBABLE	CONSÉQUENCE	CORRECTIF
a) Écoulement qui arrache et entraîne les particules de sol lorsque leur stabilité gravitationnelle est diminuée par la force de poussée verticale de l'eau. A.C.	Sols légers pulvérulents ou de faible cohésion (sable à limon).	Érosion de la section. Les cas les plus graves sont de l'érosion régressive. **	Diminuer les vitesses. Augmenter la largeur au fond. Modifier la section. Seuil. Empierrement.
b) Affleurement d'une nappe dans le talus alors que le niveau libre dans le cours d'eau est plus bas que cette ligne. A.C.	Sol peu cohérent et perméable. Alimentation importante de la nappe.	Boulance et érosion.	Diminuer la pente des talus. Drain parallèle surtout si une lentille de sable est présente.

A.C. = Cause qui augmente la contrainte

D.R. = Cause qui diminue la résistance du sol.

** Le ravinement est une conséquence encore plus grave qui combine souvent la déformation progressive à une pression interstitielle d'eau, amenant un décrochement de talus.

TABLEAU 4.11
INSTABILITÉS RELIÉES AUX TYPES DE SOL

CAUSES	MILIEU PROBABLE	CONSÉQUENCE	CORRECTIF
a) Déformation progressive permettant des fendillements où se manifeste la pression d'eau (=zone de stress nul) aggravé par le gel et le dégel. D.R.	Argile sensible (élasticité de matériau se manifeste).	Bris de face ou de pied.	- Adoucir la pente des talus. - Calcul de stabilité. - Drain parallèle dans le cas d'une nappe très alimentée.
b) Excavation affectant la stabilité à long terme de la section. A.C.	Sol pulvérulent ou de faible cohésion.	Érosion du haut et dépôt au fond pour revenir à l'angle de repos (rare car le problème d'érosion de boulance se produit habituellement AVANT).	Calcul de section stable où la pente est inférieure ou égale à l'angle de repos du sol.
	Sol cohérent.	Bris de pied ou bris de face lorsque l'horizon inférieur est résistant.	Calcul de section stable (figure 4.14).
	Matériau faible en profondeur. - argile liquide. - terre organique. - gélatine.	Rupture profonde.	Calcul de section stable (figure 4.13).
c) Rétrécissement d'argile une fois drainée laissant des plans vides verticaux, le plus souvent au bas des talus où le retour de la nappe achève de séparer les blocs de sol. D.R.	Argile, Till à matrice d'argile, dans des zones mal drainées avant le cours d'eau.	Détachement de blocs de sol.	Adoucir le talus 1 : 2.

A.C. = Augmente la contrainte
D.R. = Diminue la résistance

TABLEAU 4.12
INSTABILITÉS RÉSULTANT DES FACTEURS EXTERNES

CAUSES EXTERNES	MILIEU PROBABLE	CONSÉQUENCE	CORRECTIF
a) Dégel entraînant une action des glaces. A.C.	Sable et limon.	Les talus sont abîmés où la glace s'est fixée.	- Abaisser la lame d'eau en hiver, sinon adoucir la pente des talus. - Ensemencement.
b) Dégel entraînant une diminution de la stabilité du sol. D.R.	Sols plutôt argileux qui ont pris de l'expansion en gelant.	Décrochement de portions de sol.	- Bon drainage souterrain. - Adoucir la pente des talus. - Ensemencement.
c) Vibration, charges. A.C.	Tous les types de sol.	Fissures et bris.	- Adoucir les talus. - Empierrement.
d) Piétinement par les animaux.	Tous les types de sol.	Affouillement, éboulis.	- Clôturer. - Empêcher ou contrôler l'accès au cours d'eau par les animaux.

A.C. = Augmente la contrainte

D.R. = Diminue la résistance

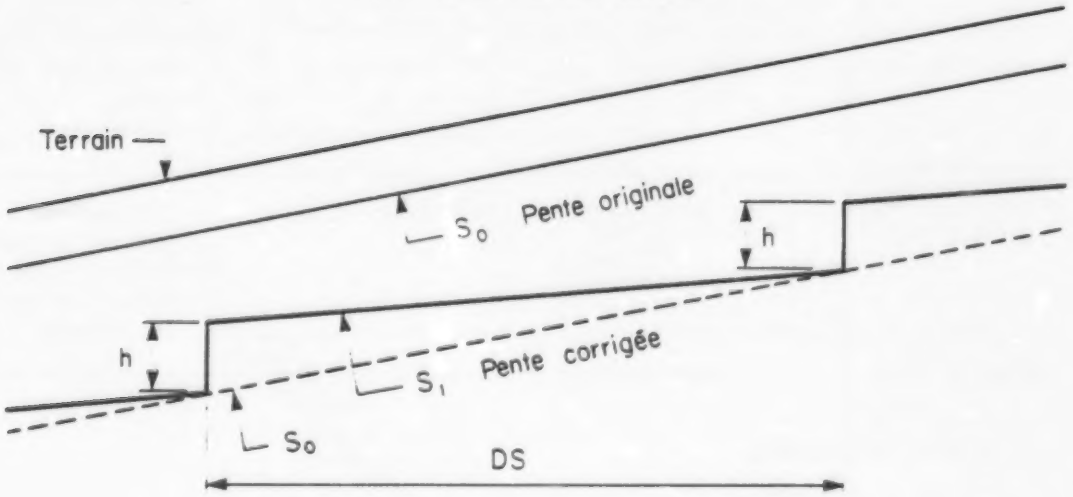
4.4 Correction de la pente longitudinale par l'aménagement de seuils

L'aménagement de seuils est traité au chapitre 5 à la section 5.3.8. Le rôle des seuils est de maintenir la pente longitudinale du cours d'eau à des limites acceptables pour la vitesse d'écoulement et pour la force tractrice.

La distance DS entre les seuils est fonction de la hauteur h des seuils, de la pente originale S_0 du cours d'eau et de la pente corrigée S_1 pour des conditions acceptables de vitesse et de force tractrice. La relation entre les différents paramètres pour le calcul de la distance DS entre les seuils s'exprime comme suit:

FIGURE 4.16

DISTANCE ENTRE LES SEUILS



$$DS = \frac{h}{S_0 - S_1}$$

DS : distance entre les seuils (m)

h : hauteur des seuils (m)

S_0 : pente originale du cours d'eau (m/m)

S_1 : pente corrigée du cours d'eau pour des conditions acceptables de vitesse et de force tractrice (m/m)

4.5 Tolérances d'exécution

Lors de l'exécution des travaux, les largeurs, pentes longitudinales et profondeurs indiquées aux plans et devis doivent être respectées. Si certaines modifications à la forme prévue de la section sont décelées, elles ne devraient être tolérées qu'à la condition de favoriser une plus grande stabilité de l'ouvrage sans réduire les dimensions minimales projetées.

4.6 ANNEXE 1

EXEMPLES DE CALCULS

Note: Les exemples qui suivent veulent mettre en relief le potentiel d'utilisation de ce guide. Ces exemples sont présentés à titre indicatif et ne limitent en rien toutes les autres possibilités de calculs qui pourraient être faites à partir des informations contenues dans le chapitre 4 et des ouvrages scientifiques énumérés en bibliographie.

4.6.1 Exemple de calculs hydrauliques

L'exemple de calculs hydrauliques est fait à partir d'un cas concret, le cours d'eau Dubois situé dans le comté d'Arthabaska. La conception d'un projet de cours d'eau passe par différentes étapes dont:

1 - plan et profil du cours d'eau existant;
2 - pentes de fond projeté;
3 - étude des sols;
4 - choix d'une section;
5 - calculs hydrauliques;
6 - vérifications des conditions d'acceptation;
7 - étude de solutions possibles;
8 - solution retenue.

La solution retenue est l'étape qui permet de préparer un projet préliminaire. La suite du cheminement est présentée à la figure 1.1 du chapitre 1.

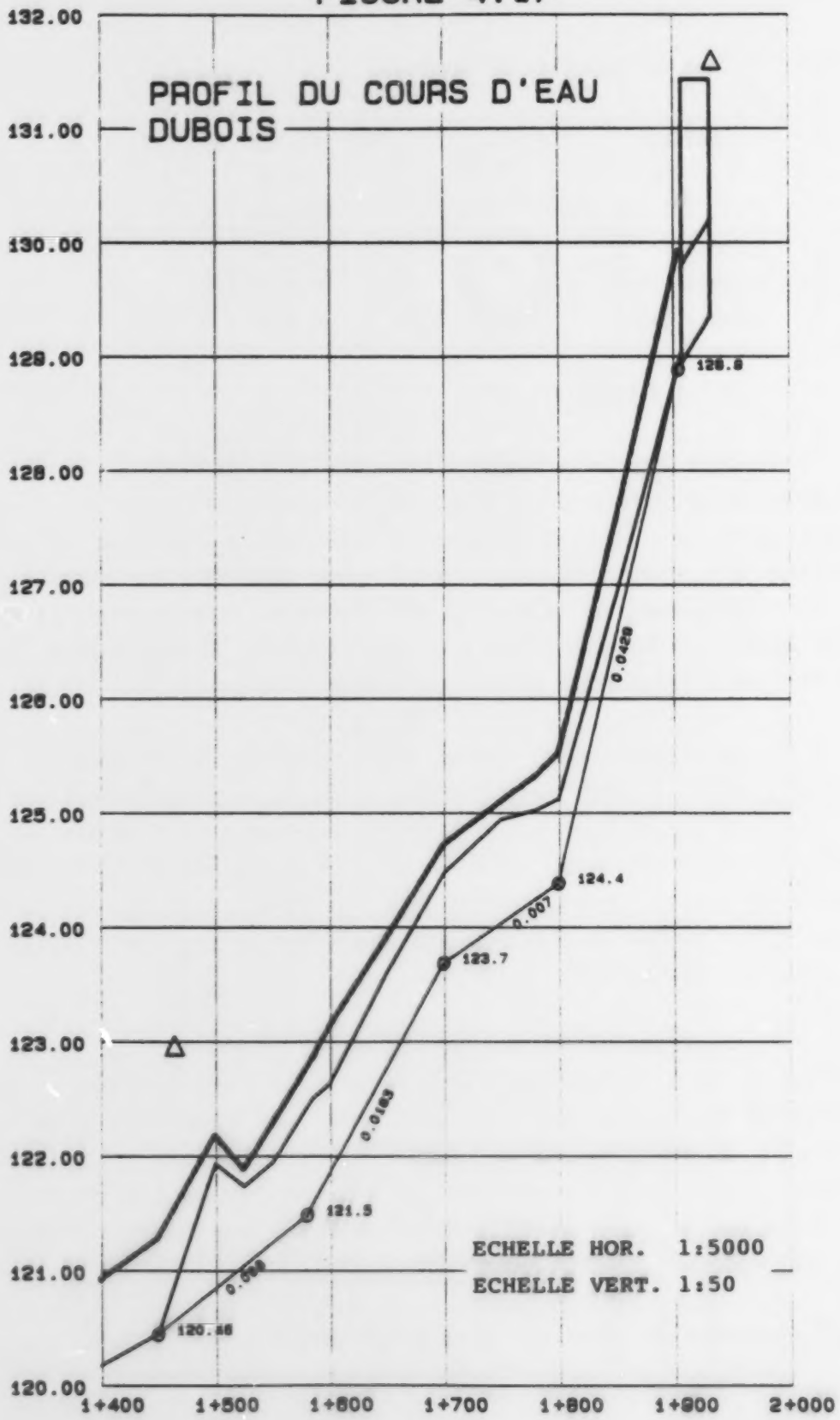
4.6.1.1 Plan et profil du cours d'eau existant

Le plan et le profil du cours d'eau existant proviennent des relevés topographiques décrits à la section 2.2.2.2 du chapitre 2.

4.6.1.2 Pentes de fond projeté

La figure 4.17 montre le profil d'une partie du cours d'eau Dubois succeptible d'être aménagée, soit entre les chaînages 1+450 et 1+905. Dans ce tronçon, les pentes de fond projeté sont tracées à environ un mètre de profondeur en suivant le pente générale du terrain. La profondeur pourra varier par la suite pour tenir compte des hauteurs hydrauliques et de la revanche. Toutefois, les pentes de fond demeurent habituellement inchangées.

FIGURE 4.17


PROFIL DU COURS D'EAU
DUBOIS
132.00
131.00
130.00
128.00
128.00
127.00
126.00
125.00
124.00
123.00
122.00
121.00
120.00
1+400
1+500
1+600
1+700
1+800
1+900
2+000
128.8
124.4
123.7
121.5
120.66
0.0429
0.007
0.0183
ECHELLE HOR. 1:5000
ECHELLE VERT. 1:50

Dans cet exemple, on retrouve:

CHAÎNAGE	PENTE DE FOND PROJETÉ (m/m)
1+450 à 1+580	0,0080
1+580 à 1+700	0,0183
1+700 à 1+800	0,0070
1+800 à 1+905	0,0429

4.6.1.3 Étude des sols

Dans un premier temps, l'étude des sols est faite à partir de la documentation existante. Dans cet exemple, on dispose de l'étude pédologique du comté d'Arthabaska qui date de 1984. Le type de sol du secteur à l'étude fait partie de la série Bedford. Le tableau 4.13 décrit les caractéristiques de la série Bedford. L'observation visuelle sur place et le sondage du sol à quelques endroits le long du cours d'eau a confirmé l'information obtenue par l'étude pédologique.

Le sondage du sol révèle, selon l'observation, un matériau pulvérulent fin. À partir des caractéristiques de la série Bedford, il est possible de reconstituer la courbe granulométrique pour l'horizon Ckg situé entre 64 et 80 cm de profondeur. Cette courbe parait représentative des matériaux qui seront affectés lors des travaux. La figure 4.18 montre cette courbe et les valeurs d_{10}, d_{50} et d_{75} qui sont utilisées dans les calculs.

L'information fournie par la courbe granulométrique permet de situer la série Bedford, horizon Ckg, selon la classification des sols présentée au tableau 4.8. Le tamis #200* qui a des ouvertures d'un diamètre de 0,075 mm, laisse passer 39% du sol, donc le tamis #200 retient 61% du sol. Le tamis #4* qui a des ouvertures d'un diamètre de 4,75 mm, laisse passer tout l'échantillon de sol donc le tamis #4 retient 0% du sol.

* Le diamètre des tamis est donné à la figure 4.6.

TABLEAU 4.13

CARACTÉRISTIQUES DE LA SÉRIE BEDFORD

Série BEDFORD

Horizon	Profondeur cm	Sable % 2-0.5 mm	0.5-0.25 mm	.25-.10 mm	.10-.05 mm	Sable % 2-0.05 mm	Limon % 50-2µ	Argile % < 2µ	pH H_2O	pH $CaCl_2$ 0.01M	pH NaF	C org %	Dithionite Fe %	Dithionite Al %	Pyrophosphate Fe %	Pyrophosphate Al %	Bases échangeables Ca me/100g	Mg me/100g	K me/100g	Na me/100g	H me/100g	CEC me/100g	Sat. bases %	P ass. kg/ha
Ap	0 - 30	9,0	14,0	19,0	23,0	65,0	30,5	4,5	6,20	5,90	8,20	12,40	1,10	0,06	0,30	0,24	29,37	1,04	0,14	0,10	-	38,56	100,00	21,6
Ae_{ig}	30 - 37	9,5	18,0	26,5	22,0	76,0	18,0	4,0	7,40	6,70	7,90	0,21	1,44	0,23	0,11	0,04	2,45	0,06	0,05	0,04	8,00	4,35	59,83	147,8
Bg	37 - 52	7,5	16,5	26,5	21,0	71,5	21,0	7,5	7,60	6,80	8,20	0,10	1,46	0,27	0,09	0,04	2,90	0,07	0,04	0,04	1,80	3,02	95,7	200,2
BCg	52 - 64	9,5	20,5	26,0	18,0	74,0	21,0	5,0	7,60	6,70	8,40	0,10	0,84	0,23	0,05	0,04	2,10	0,06	0,02	0,03	-	2,19	100,00	208,4
Ckg	64 - 80	11,0	18,5	22,5	20,0	72,0	24,0	4,0	7,90	7,40	9,50	0,14	1,34	0,23	0,02	0,04	9,37	0,12	0,02	0,04	4,00	13,56	70,56	15,4
Rk	80 +																							

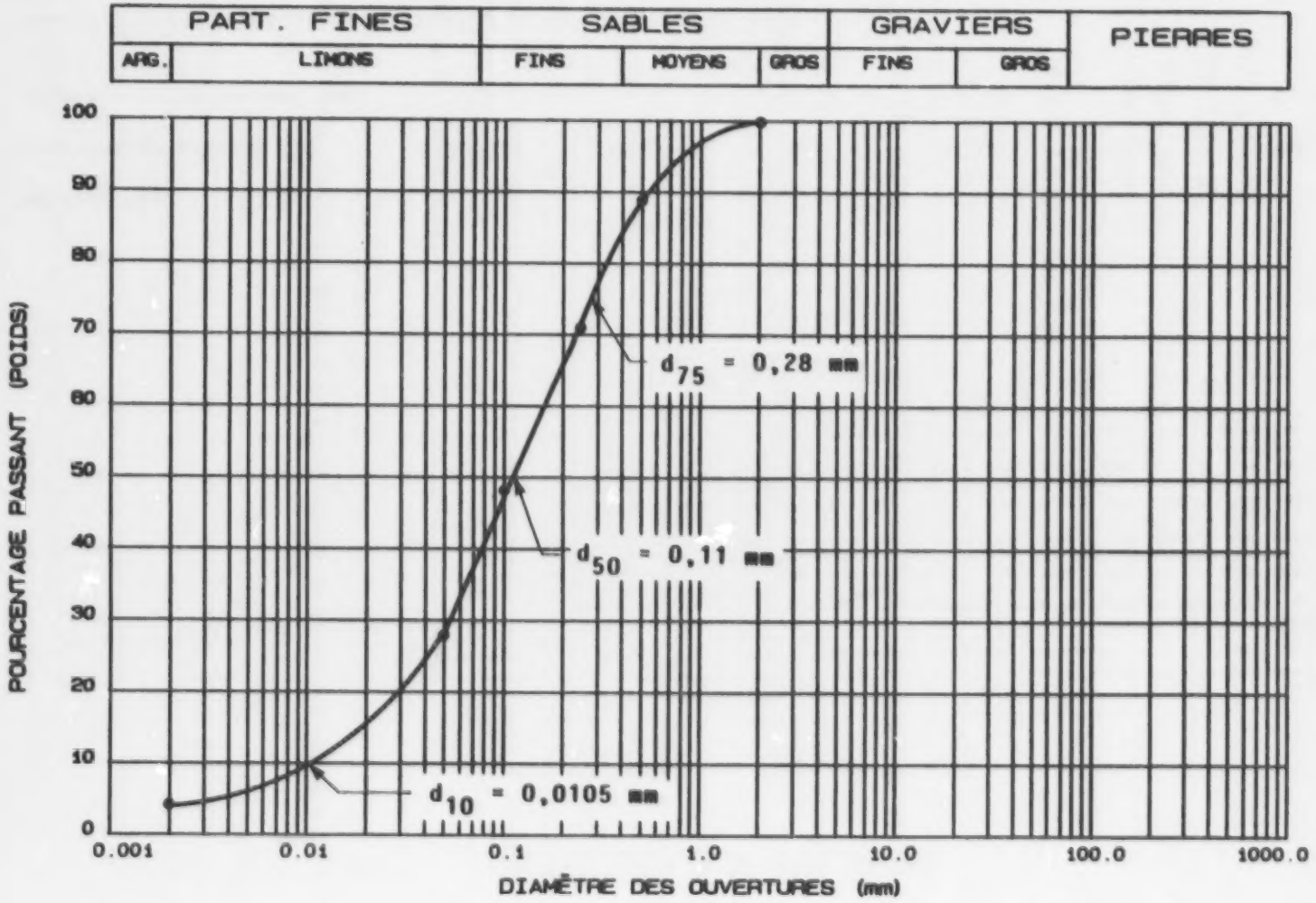
Horizon Ckg

Pourcentage passant (%)	100,0	89,0	70,5	48,0	28,0	4,0
Diamètre correspondant (mm)	2,0	0,5	0,25	0,10	0,05	0,002

Source: Étude pédologique du comté d'Arthabaska, Québec 1984

FIGURE 4.18

COURBE GRANULOMÉTRIQUE DE LA SÉRIE BEDFORD, HORIZON Ckg.



On a donc noté que 39% de l'échantillon est plus fin que le tamis #200. D'après l'observation, la résistance à sec est très faible et le sol se défait facilement, d'après le tableau 4.7 l'indice de plasticité varie entre 0 et 3, aussi on a évalué l'indice de plasticité comme étant inférieur à 4. Maintenant on peut situer ce sol (série Bedford, horizon Ckg) en fonction de la classification présentée au tableau 4.8:

Grossiers, sableux, SM, C, 12 et plus, $I_p<4$, Sable silteux.

Groupe de sol: SM.
Stabilité C: plus ou moins stable.

La description de l'horizon Ckg provenant de l'étude pédologique confirme cette analyse:

Loam sableux, brun-gris, sans structure et très friable.

4.6.1.4 Choix d'une section

4.6.1.4.1 Pente des talus

Suite à l'étude des sols, la première étape dans le choix d'une section consiste à déterminer la pente des talus pour une section trapézoïdale. D'après le tableau 4.2, la série Bedford, horizon Ckg se situe dans la catégorie "sols contenant moins de 10% d'argile". Les particules de sol sont considérées comme une argile lorsque leur diamètre est inférieur à 0,002 mm.

La courbe granulométrique indique que 4% des particules de sols ont un diamètre inférieur à 0,002 mm. La pente de talus recommandée dans ce cas est de 1:2.

4.6.1.4.2 Largeur au fond

La largeur au fond la plus efficace hydrauliquement est donnée par la relation suivante:

$$b = 2y\left(\left(\sqrt{1 + z^2}\right) - z\right)$$

on suppose une hauteur d'écoulement y = 1,0 m (section pleine, hypothèse de départ)

$b = 2\ (1)\left(\left(\sqrt{1 + 2^2}\right) - 2\right)$ d'où $b = 0{,}472$ mètre

Compte tenu du débit de design et de la situation de cette partie de cours d'eau (complètement à l'amont), on opte pour une largeur au fond minimale, soit 0,6 mètre.

Le choix de la section se résume comme suit:

pente des talus: 1 : 2
largeur au fond: 0,6 m

4.6.1.5 Calculs hydrauliques

Les calculs hydrauliques sont faits à partir des hypothèses suivantes:

- écoulement permanent uniforme;
- le cours d'eau est en sol non protégé.

L'ensemencement apporte un facteur de sécurité additionnel contre l'érosion du lit.

4.6.1.5.1 Choix d'un coefficient de rugosité

Comme on l'a mentionné précédemment, le choix du coefficient de rugosité est très important dans l'équation de Manning et l'ensemble des calculs hydrauliques. Aussi les calculs sont faits en considérant deux éventualités, soit le cours d'eau fraîchement excavé puis le cours d'eau après quelques années.

Le coefficient de rugosité est déterminé en fonction du tableau 4.3 qui décrit plusieurs types de cours d'eau et donne trois valeurs de n pour chacun d'eux. Les valeurs moyennes sont choisies dans ce cas.

Premier choix : n = 0,022 (A.a.2 - propre, après quelques crues).
Deuxième choix: n = 0,027 (A.a.4 - avec herbes courtes, un peu de mauvaises herbes).

4.6.1.5.2 Calculs proprement dits

L'équation de Manning est retenue pour le calcul de la vitesse d'écoulement. L'équation de continuité Q = VA est appliquée par la suite (Voir section 4.2.4.3). Le débit de design a été établi pour une récurrence de 5 ans et évalué à 1,0 m^3/s selon l'étude hydrologique.

La force tractrice est calculée pour le fond et les talus. Le rapport b/y est calculé pour la section présentant la vitesse d'écoulement la plus grande, dans ce cas, V = 2,897 m/s, y_n = 0,286 m et b/y = 2,1. Selon la figure 4.9, en utilisant z = 2 (pente des talus 1 : 2) on trouve P_t = 0,77 et P_f = 0,91. La force tractrice maximale la plus grande s'exerce au fond et c'est cette force qui est considérée dans un premier calcul.

Le nombre de Froude est calculé afin de déterminer si l'écoulement, en plus d'être permanent et uniforme, est fluvial, critique ou torrentiel (voir section 4.1.2).

Le tableau 4.14 résume les résultats des calculs hydrauliques pour le cours d'eau Dubois.

4.6.1.6 Vérifications des conditions d'acceptation

4.6.1.6.1 Vitesse maximale permise

Le tableau 4.9 permet de calculer la vitesse maximale permise dans les canaux en terre non protégés en fonction des matériaux constituant le lit du cours d'eau.

TABLEAU 4.14

RÉSUMÉ DES CALCULS HYDRAULIQUES DU COURS D'EAU DUBOIS

COEFFICIENT DE RUGOSITÉ	CHAINAGE	PENTE (m/m)	HAUTEUR NORMALE (m)	VITESSE D'ÉCOULEMENT (m/s)	FORCE TRACTRICE POUR LE FOND (Pa)	NOMBRE DE FROUDE	ÉCOULEMENT
n = 0,022	1+450 à 1+580	0,0080	0,428	1,605	17,7	0,988	Fluvial
	1+580 à 1+700	0,0183	0,352	2,179	34,4	1,456	Torrentiel
	1+700 à 1+800	0,0070	0,441	1,528	15,9	0,928	Fluvial
	1+800 à 1+905	0,0429	0,286	2,987	68,1	2,176	Torrentiel
n = 0,027	1+450 à 1+580	0,0080	0,471	1,377	19,1	0,813	Fluvial
	1+580 à 1+700	0,0183	0,388	1,874	37,4	1,202	Torrentiel
	1+700 à 1+800	0,0070	0,485	1,312	17,2	0,765	Fluvial
	1+800 à 1+905	0,0429	0,316	2,571	73,8	1,797	Torrentiel

Les matériaux constituant le lit du cours d'eau sont de type pulvérulent fin, selon l'étude de sol. Par hypothèse, on utilise l'écoulement chargé de sédiments qui permet des vitesses maximales plus grandes que l'écoulement sans sédiments. Le d_{75}, relevé sur la figure 4.18, est égal à 0,28 mm, soit plus petit que 0,4 mm. Selon le tableau 4.9, la vitesse maximale permise est alors égale à 0,61 m/s.

4.6.1.6.2 Calcul de la pente respectant la vitesse maximale permise

On reprend les calculs hydrauliques avec cette fois comme inconnue la pente S qui respecte la vitesse maximale permise de 0,61 m/s. Ces calculs sont faits par itération en supposant une hauteur d'écoulement et une pente S pour un débit de design de 1,0 m^3/s. Les calculs nous donnent:

pour n = 0,022	on trouve	S = 0,0006
pour n = 0,027	on trouve	S = 0,0009

La situation la plus critique est lorsque le canal est non protégé (immédiatement après le creusage), soit pour n = 0,022 et qui donne une pente S = 0,0006.

4.6.1.6.3 Force tractrice critique

La force tractrice critique par unité de surface mouillée se détermine à partir de la figure 4.10. Comme on l'a vu plus haut, le lit du cours d'eau Dubois est constitué d'un sol pulvérulent fin d'après l'étude faite préalablement. Le d_{50} est égal à 0,11 mm d'après la courbe granulométrique de la figure 4.18.

Pour les matériaux pulvérulents fins on utilise le graphique de la partie supérieure de la figure 4.10. Pour notre cas, la force tractrice critique pour une eau avec beaucoup de sédiments fins et un d_{50} = 0,11 mm, est de 3,8 Pa. Le facteur multiplicateur à la force tractrice est de 0,9, compte tenu que le terrain est faiblement accidenté et que le cours d'eau a peu de courbes. On obtient alors la force tractrice critique pour le cours d'eau Dubois comme suit:

$$T_c = 0,9 \times 3,8 = 3,4 \text{ Pa}$$

4.6.1.6.4 Discussions sur les conditions d'acceptation

Les conditions d'acceptation se résument comme suit:

Vitesse maximale permise:	0,61 m/s
Force tractrice critique:	3,4 Pa
Pente respectant la vitesse maximale permise:	0,0006 m/m

En comparant ces conditions d'acceptation avec les caractéristiques hydrauliques obtenues pour chaque tronçon du cours d'eau étudié (Tableau 4.14), on remarque qu'aucune de ces conditions n'est respectée de sorte que l'aménagement proposé au départ a des conséquences graves sur la stabilité de la section et sur l'équilibre dynamique qui existe présentement dans ce secteur. Le problème d'égouttement de ce secteur demeure et une étude de solutions possibles doit être envisagée.

4.6.1.7 Étude de solutions possibles

4.6.1.7.1 Aménagement de seuils

La correction de la pente longitudinale par l'aménagement de seuils peut s'avérer une solution possible. La pente à respecter est de 0,0006 m/m. Dans ce cas, on suppose une hauteur des seuils, h = 0,6 m. La distance DS entre les seuils pour chaque tronçon avec S_1 = 0,0006 m/m et h = 0,6 m (voir section 4.4) se résume comme suit:

Chaînage	Pente S_o	DS (mètre)
1+450 à 1+580	0,008	81
1+580 à 1+700	0,0183	33
1+700 à 1+800	0,007	93
1+800 à 1+905	0,0429	14

4.6.1.7.2 Enrochement du lit du cours d'eau

Une autre solution à considérer est l'enrochement du lit et des talus du cours d'eau par un matériel pulvérulent grossier capable de supporter les forces tractrices maximales engendrées par l'écoulement de l'eau. Par hypothèse, on choisit un matériau qui supporte la plus grande valeur calculée de la force tractrice présentée au tableau 4.14, soit T_f = 73,8 Pa. À l'aide de la figure 4.10, on détermine le d_{75} du matériau recherché. On peut utiliser directement l'équation pour les sols pulvérulents grossiers avec le facteur multiplicateur égal à 1 pour cours d'eau droit:

par hypothèse $T_c = T_f$ = 73,8 Pa

T_c = 0,754 d_{75} (sols pulvérulents grossiers)

d'où $d_{75} = T_c / 0,754 = 73,8$ Pa / 0,754

d_{75} = 97,9 mm ($\simeq$100 mm)

Le matériau choisi devra avoir 75% en poids de particules ayant un diamètre inférieur à 100 mm. Évidemment, tout matériau dont le d_{75} est plus grand que 100 mm est encore plus sécuritaire.

Pour les matériaux pulvérulents grossiers, on doit tenir compte des forces de gravité et calculer la force tractrice maximale pour les talus (T_t) et la force tractrice critique pour les talus (T_c talus). En supposant que le matériau est du "tout venant de carrière", on considère celui-ci comme très anguleux. La partie inférieure gauche de la figure 4.10 nous donne l'angle de repos de ce matériau pour un d_{75} = 100 mm, soit 41°.

Le rapport K des forces tractrices entre le talus et le fond peut être calculé par la formule ou déterminé par le graphique de la partie inférieure centrale de la figure 4.10. L'angle des talus α est l'arc cotangente de 2, soit 26,6°. On trouve K = 0,73 et alors:

T_c talus = K T_c fond = 0,73 x 73,8

T_c talus = 54 Pa

La force tractrice pour les talus se calcule par l'équation:

$T_t = P_t \gamma_w R_h S$ (Voir section 4.3.2.2)

P_t = 0,77 d'après la figure 4.9 avec z = 2,
b = 0,6 m et y = 0,286 m.

La plus grande force tractrice calculée pour le fond a été établie précédemment à 73,8 Pa pour une pente, S = 0,0429 et n = 0,027. À ces conditions R_h = 0,193 m (voir annexe 2, section 4.7).

T_t = 0,77 x 9800 x 0,193 x 0,0429

T_t = 62,5 Pa

On obtient un déséquilibre car

$T_t > T_c$ talus, (62,5 > 54)

Le matériau choisi initialement avec $d_{75} \geqslant 100$ mm n'est pas suffisant, on refait un autre calcul avec un matériau dont le d_{75} est plus grand ou égal à 150 mm.

Pour cette nouvelle condition, α et θ ne changent pas (voir les graphiques inférieurs de la figure 4.10), donc K = 0,73.

T_c fond = 0,754 d_{75} soit: 0,754 x 150 = 113 Pa

T_c talus = K T_c fond = 0,73 x 113 = 82 Pa

La valeur de T_t, avec ces nouvelles conditions, ne change pas également, alors la condition d'acceptation pour le talus est respectée pour un facteur multiplicateur égal à 1 (cours d'eau droit) et un facteur multiplicateur égal à 0,9 (peu de courbes).

$T_t \leqslant T_c$ talus

62,5 Pa $<$ 82 Pa (cours d'eau droit)

62,5 Pa $<$ 74 Pa (peu de courbes)

Le choix pour l'empierrement de la plus forte pente du cours d'eau Dubois est du "tout venant de carrière" ayant un d_{75} plus grand ou égal à 150 mm.

4.6.1.7.2.1 Vérification de la vitesse maximale permise avec $d_{75} \geqslant 150$ mm

Après avoir déterminé le type d'empierrement à partir de la méthode de la force tractrice, on peut vérifier si les vitesses dans le cours d'eau enroché ne dépasse pas la vitesse maximale permise. Le coefficient de rugosité dans ce cours d'eau devient égal à 0,04 (tableau 4.3, A.d.2 valeur moyenne). La vitesse moyenne calculée selon l'équation de Manning avec la pente la plus raide, soit S_0 = 0,0429 et un débit de 1,0 m^3/s est de 1,9 m/s. À cette condition, on a une hauteur hydraulique normale y_n égale à 0,382 mètre.

La vitesse maximale permise se détermine à partir du tableau 4,9, pour un sol pulvérulent avec un écoulement sans sédiment et un $d_{75} > 2,0$ mm, on a alors:

$V_m = V_B \; A_f \; B_f \; D_f$

V_B = 3,3 m/s (graphique supérieur droit de la figure 4.8, avec d_{75} = 150 mm et eau sans sédiment)

Facteur de correction A_f:

$$\text{Rapport de sinuosité} = \frac{\text{rayon de courbure}}{\text{largeur au miroir}}$$

Largeur au miroir ℓ = 2,13 m avec y_n = 0,382 m, z = 2 et b = 0,6 m.
Rayon de courbure = 3 fois la largeur au fond soit, 3 x 0,6 = 1,8 m, d'après le tableau 4.5.

Rapport de sinuosité = 1,8 / 2,13 = 0,85

Comme le rapport de sinuosité le plus faible est de 5, alors on prend le facteur de correction A_f le plus petit, soit:

A_f = 0,7 (voir figure 4.8).

Facteur de correction B_f = 0,76 (pente des talus, z = 2) voir figure 4.8

Facteur de correction D_f = 0,9 (y_n = 0,382 m) voir figure 4.8

Vitesse maximale permise:

V_m = 3,3 x 0,7 x 0,76 x 0,9

V_m = 1,58 m/s

La condition de vitesse maximale n'est pas respectée (1,9 m/s > 1,58 m/s), on choisit alors un matériau dont le d_{75} est supérieur à 200 mm de sorte que:

V_B = 4,0 m/s (graphique supérieur droit de la figure 4.8 avec d_{75} = 200 mm et eau sans sédiment).

V_m = 4,0 x 0,7 x 0,76 x 0,9 (les facteurs de correction ne changent pas)

V_m = 1,92 m/s et on a calculé précédemment

V = 1,9 m/s alors $V < V_m$

Le choix final pour l'empierrement de la plus forte pente du cours d'eau Dubois est du "tout venant de carrière" ayant 75% en poids de particules de diamètre inférieur à 200 mm et plus, soit un $d_{75} \geqslant 200$ mm.

4.6.1.8 Solution retenue

Deux solutions possibles ont été étudiées, ce qui ne signifie pas qu'il n'y a pas d'autres alternatives comme l'implantation d'un couvert végétal à l'aide de produit organique (ex: balles de foin ou de paille). Cet exemple de calcul visait à faire ressortir les possibilités de calculs à partir des caractéristiques physiques du sol composant le lit du cours d'eau Dubois.

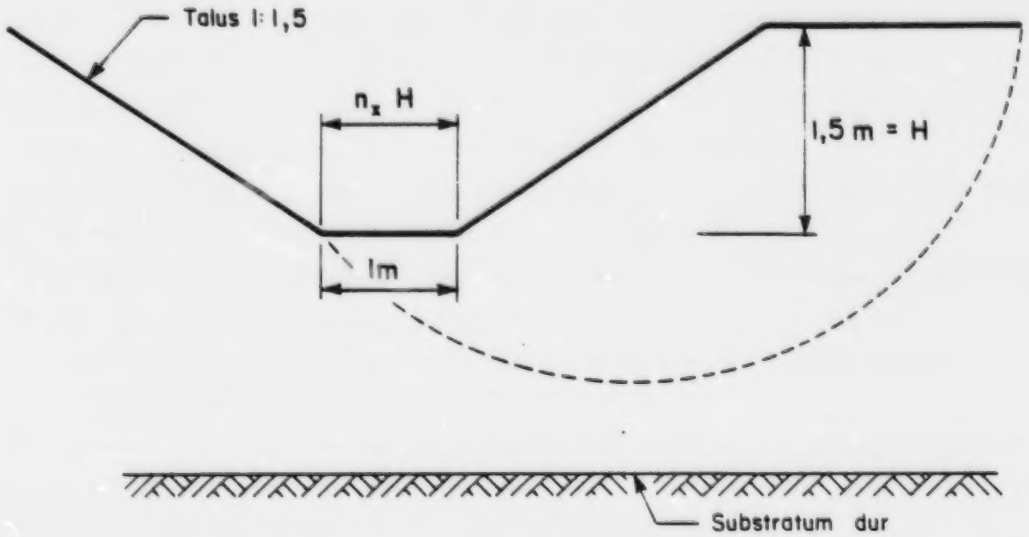
La solution retenue peut être un agencement de seuils pour les faibles pentes et d'un enrochement du lit pour les fortes pentes. Les calculs des hauteurs d'écoulement, des revanches et de la profondeur finale de la ligne de fond sont faits pour chacune des solutions possibles. Le choix final doit tenir compte des coûts des différentes alternatives.

4.6.2 Stablité des talus: exemple de calcul du facteur de sécurité dans une argile homogène

L'analyse d'une argile à partir de cylindres de sol non remanié et de tests effectués avec un scissomètre nous donne les résultats suivants:

$$\gamma_s = 14{,}2 \text{ kN/m}^3 \quad \text{et} \quad C = 66 \text{ kPa}$$

Le dimensionnement du cours d'eau, suite aux calculs hydrauliques et aux besoins agricoles, se présente comme suit:



Il n'y a pas de mesure de l'angle de friction interne. La pire situation est lorsque $\phi = 0°$ (figure 4.14) et n_x H = b (largeur au fond).

1 - Valeur de n_x: n_x H = 1

n_x = 1/ 1,5 = 0,67

2 - Angle de la pente des talus: α = arc cotangente de 1,5

α = 33,69°

3 - Détermination de n_d:

Sur la figure 4.14, coin supérieur droit, on trouve: n_d = 1,5 avec n_x = 0,67 et α = 33,69°

4 - Détermination du nombre de stabilité m:

Sur la figure 4.14, partie gauche, on trouve avec $n_d = 1,5$ et $\alpha = 33,69°$, le nombre de stabilité $m = 0,17$ et l'on se situe dans la zone 1, rupture en cercle.

5 - Calcul du facteur de sécurité:

$$FS = \frac{C}{m\ \gamma_s\ H}$$

$$FS = \frac{66\ kPa}{0,17 \times 14,2\ kN/m^3 \times 1,5\ m}$$

$$FS = 18,23$$

Le facteur de sécurité est suffisamment grand pour qu'il n'y ait pas de rupture en cercle du talus.

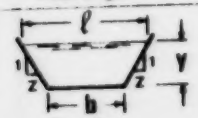
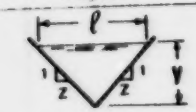
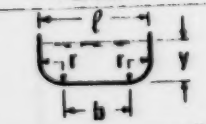
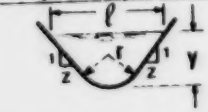
4.7 ANNEXE 2

PROPRIÉTÉS GÉOMÉTRIQUES DES CANAUX

4.7 ANNEXE 2

PROPRIÉTÉS GÉOMÉTRIQUES DES CANAUX

(Extrait de: Ven Te Chow, Open Channel Hydraulics)

Section	Surface A	Périmètre mouillé P	Rayon hydraulique R_h	Largeur superficielle ℓ
 Rectangle	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b
 Trapèze	$(b+zy)\,y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)\,y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$
 Triangle	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 Cercle	$1/8(\psi-\sin\psi)\,d^2$	$1/2\,\psi d$	$1/4\left(1-\frac{\sin\psi}{\psi}\right)d$	$d\sin(\psi/2)$ ou $2\sqrt{y(d-y)}$
 Parabole	$2/3\,\ell y$	$\ell+8/3\,y^2/\ell$ *	$\frac{2\ell^2 y}{3\ell^2+8y^2}$ *	$3/2\quad A/y$
 a) rectangle, coins arrondis	$\left(\frac{\pi}{2}-2\right)r^2+(b+2r)y$	$(\pi-2)r+b+2y$	A/P	$b+2r$
 b) triangle avec la base arrondie	$\frac{\ell^2}{4z}-\frac{r^2}{z}(1-z\cot^{-1}z)$	$\frac{\ell}{z}\sqrt{1+z^2}-\frac{2r}{z}(1-z\cot^{-1}z)$	A/P	$2[z(y-r)+r\sqrt{1+z^2}]$

* Pour $x \geq 1$ prendre l'expression exacte: $P=(\frac{\ell}{2})[\sqrt{1+x^2}+\frac{1}{x}\ln(x+\sqrt{1+x^2})]$ $\quad \frac{4y}{\ell}$

4.8 ANNEXE 3

LISTE DES PARAMÈTRES UTILISÉS DANS LE CHAPITRE 4

4.8 ANNEXE 3: LISTE DES PARAMÈTRES UTILISÉS DANS LE CHAPITRE 4

A : aire de la section d'écoulement (m^2)

A_f : facteur de correction pour la sinuosité dans le calcul de la vitesse maximale permise

A_s : surface de la tranche de sol pour le calcul du cercle de rupture (m^2)

b : largeur au fond (m)

B_f : facteur de correction pour la pente des talus dans le calcul de la vitesse maximale permise

C : cohésion (kPa)

C_f : facteur de correction pour la densité dans le calcul de la vitesse maximale permise

CG : position du centre de gravité

Ch : coefficient de la formule de Chézy

d_{10} : diamètre où 10% des grains d'un échantillon de sol ont un diamètre inférieur à celui-ci (mm)

d_{50} : diamètre où 50% des grains d'un échantillon de sol ont un diamètre inférieur a celui-ci (mm)

d_{75} : diamètre où 75% des grains d'un échantillon de sol ont un diamètre inférieur à celui-ci (mm)

D_f : facteur de correction pour la hauteur d'écoulement de l'eau dans le calcul de la vitesse maximale permise

DS : distance entre deux seuils (m)

e : indice de vide

E : énergie spécifique de l'eau en mouvement par rapport au fond du cours d'eau (m)

F_f : facteur de correction pour la récurrence dans le calcul de la vitesse maximale permise

FM : facteur multiplicateur servant au calcul de l'ouverture du cours d'eau en fonction de la profondeur (voir pente des talus)

Fr : nombre de Froude

FS : facteur de sécurité

g : constante gravitationnelle (m/s^2)

h : hauteur des seuils (m)

H : profondeur de la section du cours d'eau ou hauteur du talus (m)

i : gradient hydraulique

I_p : indice de plasticité (%)

K : rapport des forces tractrices entre le talus et le fond

ℓ : largeur au miroir ou largeur superficielle (m)

L : distance entre deux points d'un tronçon de cours d'eau (m)

LA : largeur de la tranche de sol étudié (m)

m : nombre de stabilité

M : charge par unité de surface dans l'utilisation d'un scissomètre (kPa)

M_m : moment menant (kN.mètre/mètre d'épaisseur)

M_r : moment résistant (kN.mètre/mètre d'épaisseur)

n : coefficient de rugosité du lit et des parois du cours d'eau

n_d : facteur multiplicateur de H permettant de situer la profondeur du substratum dur donnée par la relation n_d H (m)

n_x : facteur multiplicateur de H représentant la distance horizontale entre le bas du talus et l'intersection du cercle de rupture donnée par la relation n_x H (m)

O : centre du cercle de rupture

P : périmètre mouillé de la section de cours d'eau (m)

P_t : proportion entre T_f et le produit $\gamma_w R_h S_o$

P_f : proportion entre T_t et le produit $\gamma_w R_h S_o$

Q : débit (m^3/s)

R : résultante des forces de gravité et de pression de la nappe d'eau (N)

r : rayon du cercle de rupture (m)

Re : nombre de Reynolds

R_h : rayon hydraulique de la section du cours d'eau (m)

S : pente de la ligne d'énergie (m/m)

S_o : pente du fond du cours d'eau (m/m)

S_1 : pente corrigée du fond du cours d'eau pour des conditions acceptables de vitesse et de force tractrice (m/m)

T : force tractrice par unité de surface mouillée (Pa)

t : temps (minute, heure, jour)

T_c : force tractrice critique par unité de surface mouillée (Pa)

T_f : force tractrice maximale par unité de surface mouillée pour le fond d'une section trapézoïdale (Pa)

T_t : force tractrice maximale par unité de surface mouillée pour les talus d'une section trapézoïdale (Pa)

u : pression interstitielle (kPa)

V : vitesse moyenne d'écoulement de l'eau à une section donnée d'un cours d'eau (m/s)

V_B : vitesse de base servant au calcul de la vitesse maximale permise (m/s)

V_m : vitesse maximale permise (m/s)

W : poids d'une tranche de sol par mètre linéaire de cours d'eau (kN/m)

w : teneur en eau d'un sol (%)

w_L : limite liquide ou teneur en eau d'un sol à la limite liquide (%)

w_P : limite plastique ou teneur en eau d'un sol à la limite plastique (%)

w_R : limite de retrait ou teneur en eau d'un sol à la limite de retrait (%)

X : angle entre le rayon du cercle de rupture et la verticale (°)

y : hauteur hydraulique (m)

y_c : hauteur hydraulique critique (m)

y_n : hauteur hydraulique normale correspondant à la formule de Manning (m)

z : fruit de la pente des talus ou cotangente de l'angle de la pente des talus

Z_o : élévation du fond du cours d'eau par rapport à un datum au point 0 (m)

α : angle de la pente des talus (°)

β : angle entre la résultante des forces en jeu et la verticale dans le phénomène de boulance (°)

γ_s : poids volumique du sol (kN/m^3)

γ_w : poids volumique de l'eau (kN/m^3)

ϕ : angle de friction interne (°)

θ : angle de repos du sol (°)

ρ_m : masse spécifique du sol (kg/m^3)

ρ_w : masse spécifique de l'eau (kg/m^3)

τ : force de cisaillement par unité de surface (kPa)

CHAPITRE 5

IMPACTS ET MESURES DE MITIGATIONS

CHAPITRE 5

IMPACTS ET MESURES DE MITIGATIONS

			Page
5.1	Impacts		5-5
	5.1.1	Pour le cours d'eau	5-6
	5.1.2	Pour la flore	5-6
	5.1.3	Pour la faune	5-7
5.2	Avantages des mitigations		5-7
	5.2.1	Diminution des interventions nécessaires à l'entretien	5-8
	5.2.2	Meilleure protection des sols de surface	5-8
	5.2.3	Diminution des accidents	5-8
	5.2.4	Meilleur rendement du drainage souterrain	5-9
	5.2.5	Meilleure qualité des eaux	5-9
	5.2.6	Maintien de l'habitat riparien et aquatique	5-9
5.3	Description des mitigations		5-9
	5.3.1	Établissement d'un calendrier des opérations	5-10
		5.3.1.1 Faune terrestre	5-10
		5.3.1.2 Choix de la machinerie d'exécution	5-10
		5.3.1.3 Milieux humides	5-11
	5.3.2	Méthologie d'exécution	5-12
	5.3.3	Accès au cours d'eau et protection de la faune	5-12
		5.3.3.1 Milieu agricole	5-12
		5.3.3.2 Milieu forestier	5-13
	5.3.4	Protection des sols arables	5-14
		5.3.4.1 Régalage	5-15

		Page
	5.3.4.2 Transport	5-15
	5.3.4.3 Enfouissement	5-15
5.3.5	Aménagement progressif	5-16
5.3.6	Aménagement sur une seule rive	5-16
5.3.7	Confection des pentes en fonction de la stabilité des talus	5-17
5.3.8	Aménagement de seuils	5-18
5.3.9	Aménagement de fosses à sédimentation	5-22
	5.3.9.1 Fosse temporaire à sédiments	5-24
	5.3.9.2 Fosse permanente à sédiments	5-24
5.3.10	Enrochement et gabion	5-31
5.3.11	Ensemencement des talus	5-32
	5.3.11.1 Pour les surfaces agricoles	5-32
	5.3.11.2 Pour les surfaces boisées	5-36
5.3.12	Confection du profil en long en fonction de la faune aquatique	5-37
5.3.13	Dégagement végétal léger	5-38
5.3.14	Déchiquetage en copeaux	5-40
5.3.15	Aménagement de frayères	5-40
5.4	Annexe 1: Exemples d'interventions en milieu boisé	5-44

LISTE DES FIGURES

		Page
5.1	Exemples d'aménagement de cours d'eau	5-19
5.2	Aménagement d'un seuil	5-21
5.3	Seuil en enrochement pour des fins fauniques (salmonidés)	5-23
5.4	Fosse temporaire à sédiments: création d'une fosse dans le lit de la rivière	5-25
5.5	Fosse temporaire à sédiments: déversoir en sacs de sable, ou en pierres	5-26
5.6	Fosse permanente de sédimentation	5-28
5.7	Solution graphique de l'équation de Vetter	5-30
5.8	Dégagement végétal léger	5-39
5.9	Aménagement de frayères à l'aide de seuils (troncs)	5-42

5 IMPACTS ET MESURES DE MITIGATIONS

L'aménagement d'un cours d'eau pour des fins de drainage agricole implique généralement des actions majeures (calibrage, profilage, redressement, etc...) qui modifient le comportement hydraulique du cours d'eau et le milieu dans lequel évolue ce dernier.

Ces modifications engendrent des impacts qui, s'ils sont mal identifiés et par la suite incorrectement corrigés, peuvent réduire grandement la qualité du milieu et amoindrir la durée de vie des travaux.

Nous présentons sommairement dans ce chapitre une liste des impacts potentiels et prévisibles auxquels une attention particulière doit être portée lors de la conception des projets d'aménagement.

Une série de mesures de mitigations susceptibles d'éliminer ou d'amoindrir les effets négatifs issus des travaux ont été intégrées à ce chapitre.

Il appartient donc au responsable du projet d'aménagement de bien analyser les divers paramètres conditionnant l'évolution du cours d'eau, d'en identifier les zones fragiles et d'établir avec les ministères concernés les impacts potentiels sur le milieu.

A la lumière des données recueillies et des informations obtenues auprès des autres intervenants, les mesures de mitigations qui sont jugées essentielles sont intégrées au projet pour assurer la pérennité des travaux et le maintien de la qualité du milieu.

5.1 IMPACTS

L'aménagement d'un cours d'eau entraîne souvent des répercussions importantes non seulement sur le cours d'eau lui-même mais encore sur ses rives et sur la flore qui s'y trouve.

Ces répercussions ou impacts ne se limitent pas à la zone proprement dite des travaux, le secteur aval subissant lui aussi les effets du réaménagement. De plus, ces répercussions ont des intensités et des durées diverses compte tenu de la nature et de l'ampleur des travaux ainsi que de la fragilité du milieu aménagé.

Les principaux impacts prévisibles sont:

5.1.1 Pour le cours d'eau

- Potentiel d'érosion accentué à cause de la fragilité des berges et du lit remaniés;
- déposition de sédiments dans la partie aval du cours d'eau;
- modification de l'hydrogramme et du comportement du cours d'eau: étiage prononcé et pointe de crue plus élevée;
- dégradation de la qualité des eaux par apport supplémentaire d'éléments lessivés et de matières en suspension.

5.1.2 Pour la flore

- Perte momentanée du couvert végétal recouvrant les rives du cours d'eau;
- perte du couvert forestier dans les secteurs boisés;
- appauvrissement de la diversité de la flore aux abords du cours d'eau;
- diminution du nombre d'étages de la végétation (arbres et arbustes).

5.1.3 Pour la faune

- Perte de certains habitats aquatiques et ripariens;

- perte de diversité de milieux dans le fond du cours d'eau: élimination de l'alternance des fosses et des rapides;

- risque de disparition des espèces aquatiques acclimatées aux eaux froides (salmonidés);

- élévation de la température des eaux et baisse de la teneur en oxygène dissous;

- accroissement de la concentration des pesticides et des engrais;

- risque d'apparition d'espèces aquatiques non sportives: carpes, cyprins, cabostomes, etc.;

- baisse des migrations ichtyennes à cause de l'amincissement de la lame d'eau lors des étiages.

Nous n'avons répertorié ici que les impacts principaux occasionnés par un aménagement de cours d'eau. Les impacts secondaires telles l'altération du paysage et la diminution de la qualité récréative du milieu sont aussi à considérer lors de l'élaboration d'un projet de grande envergure.

5.2 AVANTAGES DES MITIGATIONS

Afin de limiter les modifications majeures sur l'équilibre hydrodynamique d'un cours d'eau, les sections suivantes présentent les avantages et la description de certaines solutions susceptibles:

- d'amoindrir les impacts négatifs;
- d'allonger la durée de vie des travaux;
- de mieux rentabiliser l'investissement requis pour l'aménagement.

L'implantation de mesures de mitigations présente des avantages de divers ordres, autant au niveau agricole qu'au niveau hydraulique et environnemental (esthétisme, qualité de l'eau, récréation). Les bénéfices attendus de la confection d'un cours d'eau bien planifié et bien réalisé sont:

5.2.1 Diminution des interventions nécessaires à l'entretien

- Diminution de l'érosion et de la sédimentation dans le cours d'eau;
- prolongation de la vie utile de l'ouvrage;
- diminution des frais d'entretien.

5.2.2 Meilleure protection des sols de surface

- Des talus stabilisés et une berme protectrice limitent le décrochement et la perte de sols agricoles.

5.2.3 Diminution des accidents

- Moins de risques de chute pour les animaux de ferme aux abords du cours d'eau;
- moins de risques de renversement de machinerie par suite des affaissements de talus.

5.2.4 Meilleur rendement du drainage souterrain

- Une réduction de la sédimentation évite une obstruction prématurée des sorties de drain souterrain, ce qui permet de maximiser les rendements agricoles sur une plus longue période.

5.2.5 Meilleure qualité des eaux

- Une lutte à l'érosion réduit la mise en suspension de sédiments affectant la qualité de l'eau;

- une diminution de la turbidité assure au milieu aquatique une meilleure oxygénation des eaux en réduisant la DBO et la DCO.

5.2.6 Maintien de l'habitat riparien et aquatique

- Protection des zones écologiquement fragiles (ex.: frayères) en limitant les perturbations dans ces secteurs;

- conservation le plus possible de l'intégrité et de la diversité du milieu.

5.3 DESCRIPTION DES MITIGATIONS

Cette section propose un choix de mesures de mitigations réalisables à des coûts raisonnables en regard des investissements occasionnés par la confection d'un cours d'eau. Certaines des mitigations proposées doivent être incorporées au projet.

5.3.1 Établissement d'un calendrier des opérations

5.3.1.1 Faune terrestre

La faune terrestre se retrouve principalement dans les zones boisées, le plus souvent dans la partie amont des bassins versants. Compte tenu que l'ensemble des mammifères (lièvres, renards, chevreuils, etc.) mettent bas au printemps (mars-avril-mai) et que leur capacité de déplacement est réduite à cause de leur progéniture, il est recommandé que les travaux préliminaires comme le déboisement soient effectués en dehors de cette période.

5.3.1.2 Faune aquatique

La faune aquatique est celle qui subit le plus de perturbations par suite des travaux d'aménagement de cours d'eau.

Parmi les mesures de protection susceptibles d'amoindrir ces impacts, le choix d'une période d'intervention appropriée contribue à assurer le succès de la migration et de la reproduction des poissons. Quoique les salmonidés n'utilisent essentiellement que les petites branches des cours d'eau à la tête des bassins versants pour se reproduire, ils doivent traverser les secteurs inférieurs pour se rendre sur les sites de reproduction et d'alevinage. Or, tout travail d'aménagement dans une des sections du cours d'eau risque de compromettre la montaison du poisson. Avec l'adoption d'un calendrier d'intervention approprié, la migration des poissons est assurée et la reproduction des espèces n'est pas mise en péril.

Calendrier proposé

Poissons	Période de reproduction	Calendrier des travaux
Truite arc-en-ciel	mars/avril/mai	Pas avant le 15 juin
Omble de fontaine (Truite mouchetée)	sept./oct./nov.	Pas avant le 15 juin et pas après le 1er septembre
Autres espèces sportives (brochet, doré, etc.)	avril/mai/mi-juin	Pas avant le 1er juillet

5.3.1.3 Milieux humides

Les milieux humides tels les marais, battures, tourbières ou étangs naturels comportent une problématique plus complexe que celle présentée dans les deux items précédents. Une végétation particulière une fluctuation des niveaux d'eau, une faune diversifiée (amphibienne, aquatique, terrestre et avienne), un pouvoir épurateur difficile à remplacer, sont tous autant d'éléments qui doivent être considérés avant intervention. Avant d'entreprendre toute action susceptible de modifier l'un ou l'autre de ces paramètres, on devrait faire appel à des spécialistes afin d'obtenir un devis d'aménagement assurant le maximum d'intégrité du milieu.

5.3.2 Choix de la machinerie d'exécution

Lors de la présentation du projet, les zones présentant une problématique sont à identifier clairement, (par exemple: milieu forestier, milieu agricole sensible au compactage. De plus lors des travaux l'utilisation d'une machinerie adaptée à ces milieux est exigée.

Le choix de la machinerie doit également se faire en fonction des critères suivants:

- intervention soignée;
- réduction du compactage du sol;
- maintien du couvert boisé au-dessus du cours d'eau;
- recherche du minimum de perturbation dans les zones à regénérescence lente;
- réduction de la durée des travaux.

5.3.3 Accès au cours d'eau et protection de la faune

L'aménagement de cours d'eau ne fait pas que modifier le cours d'eau lui-même. Le déboisement, le redressement, le creusage, le transport et l'épandage des déblais sont toutes autant d'actions modifiant la qualité intrinsèque des abords du cours d'eau. Dans le cadre d'une planification intégrée d'un secteur à réaménager, la détermination d'un corridor d'intervention peut s'avérer utile pour restreindre l'aire d'action de la machinerie et limiter la zone affectée au strict minimum autant en milieu agricole qu'en milieu forestier.

5.3.3.1 Milieu agricole

L'accès au cours d'eau en milieu agricole présente généralement peu de problème compte tenu des chemins de ferme déjà existants. Les opérateurs de machinerie lourde doivent utiliser autant que possible les

chemins existants et interdire tout va-et-vient inutile sur les terres en culture pour éviter le compactage ou tout autre dommage au sol.

Lors de l'aménagement du cours d'eau, la protection d'une berme non remaniée de trois mètres au sommet du talus s'avère une mesure de mitigation essentielle, car elle assure d'une part une meilleure stabilité des abords du cours d'eau et permet d'autre part le maintien d'une zone-tampon végétative agissant comme filtre contre le transport des sédiments charriés par le ruissellement de surface.

Du point de vue écologique, le maintien d'une berme non remaniée et exempte de tout déblai diminue la turbidité dans le cours d'eau et redonne aux rives leur aspect naturel plus rapidement.

5.3.3.2 Milieu forestier

L'aménagement de cours d'eau en milieu forestier présente une problématique plus complexe qu'en milieu agricole. Cette problématique particulière présente les aspects suivants:

- perte du couvert végétal au-dessus du cours d'eau;
- modifications majeures possibles des habitats fauniques locaux (frayères, etc.);
- augmentation de la température de l'eau et perte possible de zones salmonicoles;
- difficulté de redonner au milieu sa qualité et son aspect naturel après les travaux.

Compte tenu que l'aménagement des cours d'eau en milieu forestier entraîne des effets négatifs sur la faune et l'environnement, il faut recourir à des méthodes d'exécution mieux adaptées aux conditions particulières de ce milieu.

Lorsqu'il a été jugé nécessaire de réaménager un cours d'eau en milieu forestier, il faut:

- minimiser le plus possible les interventions requises;
- déterminer le corridor d'intervention nécessaire pour le creusage et le régalage en limitant la largeur de l'emprise requise;
- déboiser sur une seule rive en choisissant de préférence la rive nord du cours d'eau afin de garder l'écran végétal de la rive sud comme protection thermique; (réchauffement de l'eau);
- maintenir une berme non remaniée de trois mètres de largeur pour faciliter la reprise arbustive après les travaux;
- choisir une machinerie qui convienne aux travaux;
- là où aucun travail de creusage ou de redressement n'est jugé essentiel, le milieu doit être gardé intact, sans déboisement, le passage de la machinerie se faisant à l'écart du cours d'eau.

5.3.4 Protection des sols arables

Comme l'aménagement de cours d'eau a pour principal objectif d'améliorer les rendements des sols agricoles, les travaux exécutés ne doivent pas détériorer les parcelles en culture.

La production agricole est étroitement liée à la qualité du matériel formant la couche supérieure du terrain (top soil). Pour assurer le maintien de la productivité des sols agricoles, il faut être sélectif sur la méthode de disposition des déblais extraits dans le cours d'eau. Trois choix sont possibles:

1- régalage;
2- transport;
3- enfouissement.

5.3.4.1 Régalage

Les déblais compatibles avec les sols agricoles peuvent être gardés en surface à condition de respecter les deux conditions suivantes:

- régaler des déblais sur une mince couche (maximum de 10 à 15 cm) en respectant une berme de trois (3) mètres;
- enlever les débris grossiers (roches, souches, etc.).

Par suite de l'épandage en surface des déblais, si la quantité de pierres et de roches est jugée trop importante, un épierrement doit être prévu pour nettoyer la zone affectée.

En milieu forestier, les déblais peuvent être régalés sommairement ou laissés en tas tout en respectant la berme de trois (3) mètres. Pour permettre l'égouttement de la zone forestière adjacente aux travaux, il faut toutefois laisser des ouvertures libres de déblais.

5.3.4.2 Transport

Lorsque les déblais extraits du cours d'eau sont jugés incompatibles avec les sols en place, le devis d'exécution doit prévoir le transport du matériel indésirable vers des zones de dépôt, le tout en accord avec les agriculteurs intéressés. Ce transport doit s'effectuer en utilisant les chemins de ferme existants.

5.3.4.3 Enfouissement

Lorsque les déblais sont incompatibles avec les sols agricoles et que le transport est impossible (faible capacité portante, aucun chemin disponible, etc.), le matériel peut être enfoui en bordure de la zone des travaux, tout en respectant une berme de 3 mètres.

5.3.5 Aménagement progressif

Dans les milieux sablonneux ou à haut risque d'érosion, l'aménagement de cours d'eau présente souvent une problématique spéciale dans le sens où les méthodes habituelles de travail peuvent entraîner des effets non désirables. Le problème est encore plus crucial lorsque ces sols sont gorgés d'eau. En effet, le creusage d'une "tranchée" dans un terrain où la nappe d'eau est élevée crée un appel d'eau latéral, ce qui provoque un affouillement des berges (phénomène de boulance).

La solution réside dans un creusage progressif en deux étapes: la première consiste à aménager le cours d'eau selon une profondeur déterminée de manière à permettre un égouttement latéral qui limite les risques de décrochement; à l'étape suivante, la nappe d'eau dans le sol étant moins élevée, le cours d'eau peut alors être aménagé de manière définitive en respectant toutefois les pentes de talus admissibles pour assurer la stabilité des berges.

Dans les projets de grande envergure où un cours d'eau doit être aménagé avec l'ensemble de ses tributaires, il est conseillé, lorsque c'est possible, de creuser les cours d'eau secondaires avant le cours d'eau principal. Les travaux de creusage du cours d'eau principal permettent ainsi d'extraire les sédiments issus du creusage des tributaires. On nettoie cette section du cours d'eau dans la même opération.

5.3.6 Aménagement sur une seule rive

Plusieurs sections de cours d'eau peuvent être aménagées en n'intervenant que sur une seule rive. Lors de la conception du projet, on doit déterminer quelle rive fera l'objet des travaux en sélectionnant celle qui présente le moins de qualité physique et environnementale ou qui subira le moins d'inconvénients.

La section choisie doit être clairement identifiée par des bornes (piquets) et l'entrepreneur doit être avisé que la zone d'intervention est limitée à une seule rive. En réduisant ainsi l'aire d'intervention, les impacts se limitent à la rive affectée et l'ampleur des mesures de mitigations, comme l'ensemencement des talus, peut être réduite.

Dans les secteurs boisés, cette action s'impose en conservant intacte, dans la mesure du possible, la rive sud du cours d'eau; le maintien du couvert forestier sur la rive sud assure généralement un bon écran thermique et évite le réchauffement excessif des eaux.

Dans les secteurs où une rive est boisée et l'autre est en culture, la protection de la rive boisée est à conseiller.

Quoique cette mesure de protection oblige à subdiviser le cours d'eau selon les valeurs à protéger, elle permet par contre de réduire les zones d'impact et de limiter l'investissement dans la réfection environnementale du milieu.

5.3.7 Confection des pentes en fonction de la stabilité des talus

Lors de l'aménagement d'un cours d'eau, la fragilité des berges fraîchement remaniées augmente le risque d'érosion et l'absence de mesures de protection entraîne une dégradation qui peut ramener le cours d'eau dans un état pire qu'avant les travaux. Une ou plusieurs mesures de stabilisation des berges et du fond doivent être intégrées au projet pour assurer une durée de vie utile acceptable de ces travaux.

Plusieurs facteurs conditionnent l'érosion d'un cours d'eau, les trois principaux étant:

- la cohésion des sols en place (structure, granulométrie);
- la vitesse de l'eau (force d'arrachement);

- la hauteur de la nappe d'eau dans le sol à drainer.

Chacun des facteurs contribue en lui-même à engendrer de l'érosion; par contre les trois facteurs combinés multiplient le plus souvent de façon marquée les risques d'instabilité.

Compte tenu que la problématique repose sur plusieurs facteurs, la solution doit résider dans le mariage de plusieurs mesures.

À l'aide des graphiques de la figure 5.1, nous pouvons observer quelques-unes des possibilités qui s'offrent pour confectionner des pentes qui résisteront à l'érosion.

5.3.8 Aménagement de seuils

L'énergie cinétique de l'écoulement constitue un facteur majeur d'érosion et entraine un problème dans les cours d'eau localisés dans des bassins versants accidentés. Le redressement de méandres peut être aussi une cause d'érosion: l'augmentation de la pente associée à un creusage dans du matériel pulvérulent cause une dégradation des berges non protégées.

L'aménagement de seuils dissipateurs d'énergie constitue une excellente solution pour réduire la vitesse de l'eau et contrôler la capacité d'arrachement. Il est préférable d'aménager plusieurs petits seuils en escaliers plutôt que chercher à construire un gros seuil, car ce dernier constitue une barrière pour la migration des poissons et provoque une chute d'eau plus violente.

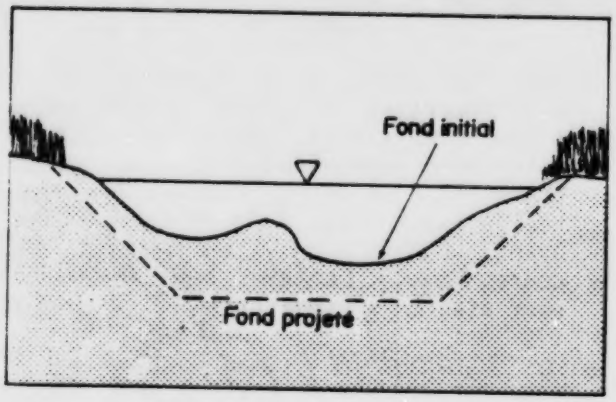
La construction de seuils à l'aide d'enrochement est plus à conseiller que l'aménagement de seuils en béton car ils modifient moins l'aspect environnemental global et sont de coût plus abordable (figure 5.2).

FIGURE 5.1

EXEMPLES D'AMÉNAGEMENT DE COURS D'EAU

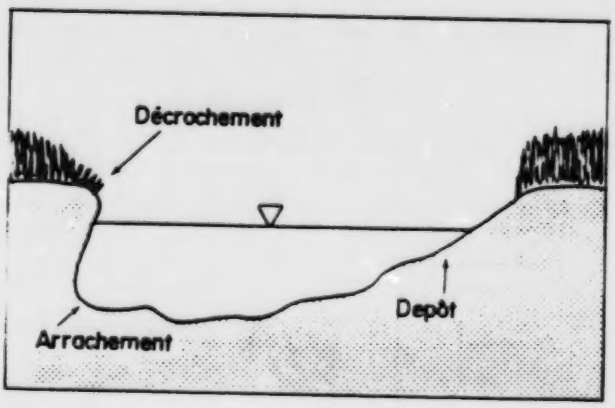
Graphique 1: avant les travaux

Nous avons ici une illustration d'une section de cours d'eau dans son état initial, avec le fond projeté et les talus 1:1.



Graphique 2: après les travaux

Suite aux travaux, le cours d'eau sans protection aura tendance à éroder les berges et à créer de part et d'autre du lit des zones d'arrachement et de dépôt (ex: dans une courbe).



Graphique 3: pente 1:2

Dans les secteurs où le sol est sensible à l'érosion et où la vitesse du courant est relativement faible, une pente des talus de 1:2 est parfois suffisante pour assurer une stabilité acceptable. L'essai dans un secteur témoin du cours d'eau permettrait de vérifier si cette mesure est seule appropriée.

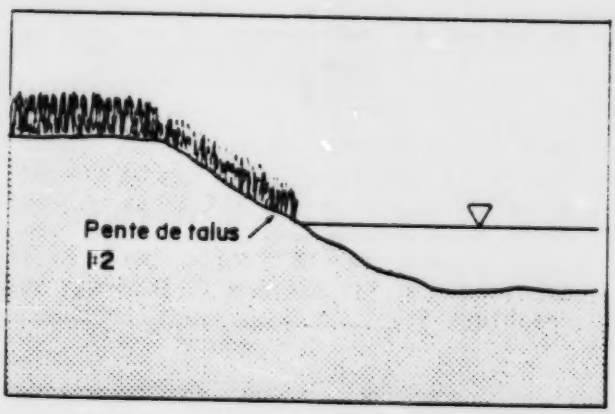
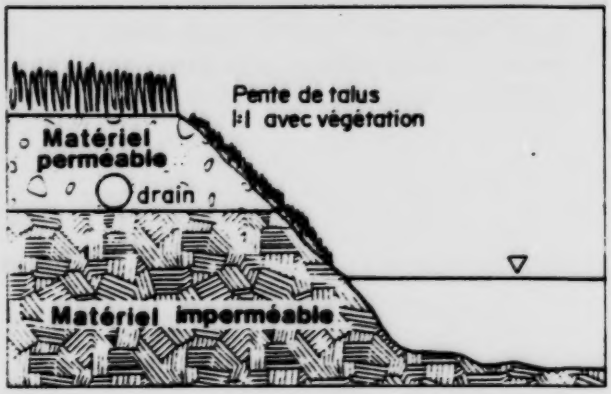


FIGURE 5.1(Suite)

EXEMPLES D'AMÉNAGEMENT DE COURS D'EAU

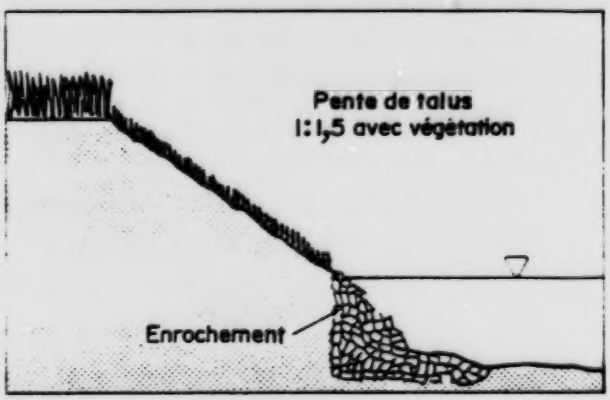
Graphique 4: drain latéral + végétation

Dans les secteurs ou l'affouillement est important à cause d'une nappe d'eau trop élevée, due à une couche inférieure imperméable, nous suggérons d'installer un drain latéral pour ramener la nappe d'eau à la hauteur voulue avant d'effectuer l'aménagement du cours d'eau. Le talus sera ensemencé pour assurer sa stabilité.



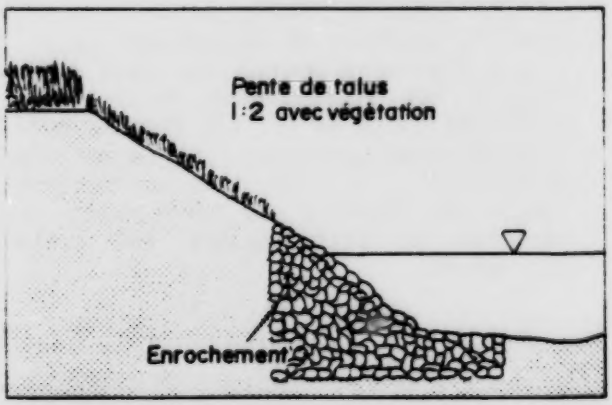
Graphique 5: aménagement d'un secteur rectiligne soumis à un courant rapide

Dans un secteur rectiligne où la vitesse de l'eau est importante, il faut effectuer un enrochement jusqu'à la ligne supérieure des eaux et revégéter le talus dont la pente est de 1:1,5.

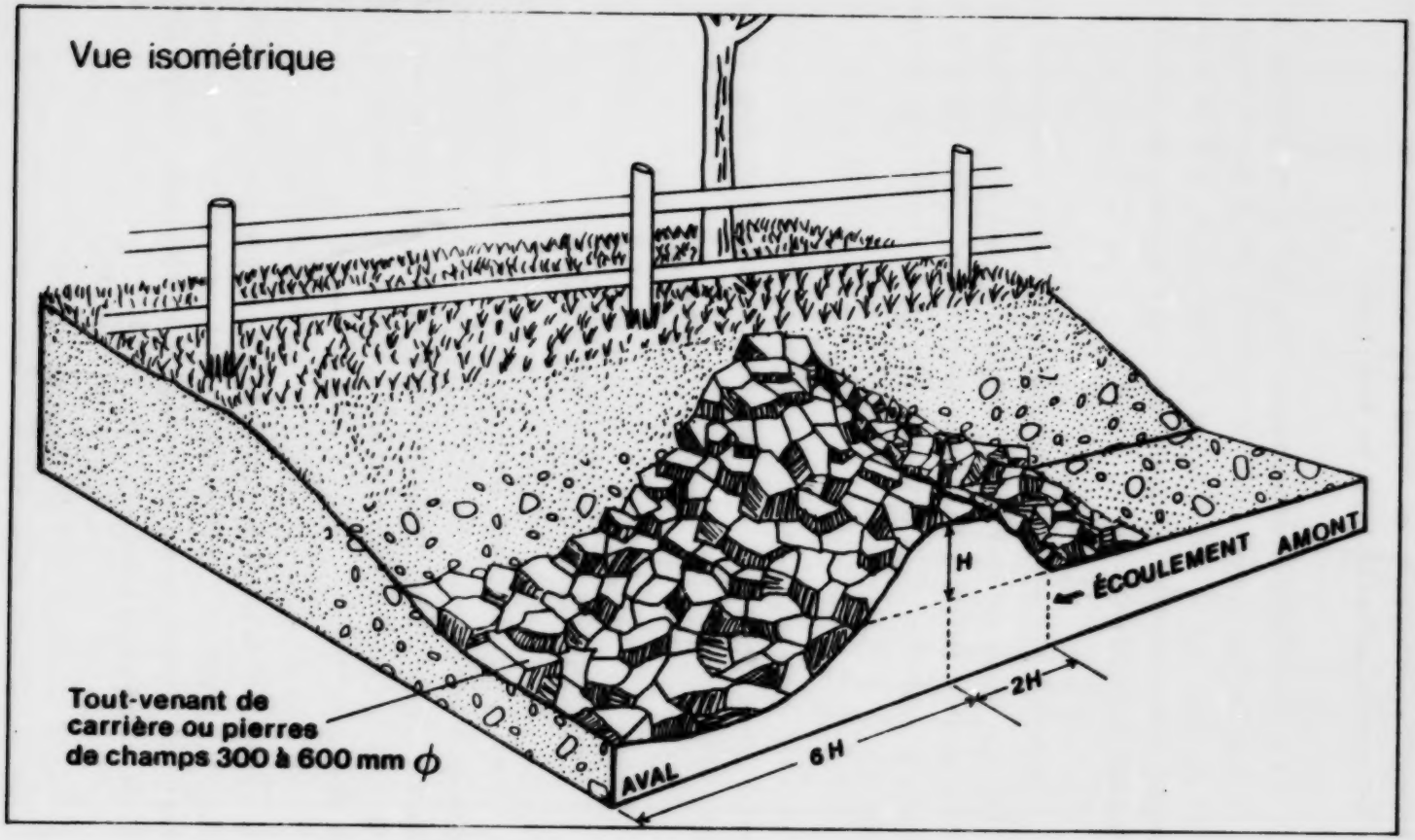


Graphique 6: aménagement d'une couche soumise à un courant rapide

Dans la section concave d'une courbe soumise à l'érosion, on recommande un enrochement plus important ainsi qu'une pente plus douce, soit 1:2. La section convexe de la courbe peut être aménagée de la manière illustrée au graphique 5.



AMÉNAGEMENT D'UN SEUIL



Des seuils de faible hauteur (de 300 mm pour les petits cours d'eau à 600 mm pour les cours d'eau plus importants) ne provoquent pas de réchauffement significatif de l'eau et permettent de conserver des teneurs en oxygène satisfaisantes en tout temps.

Afin d'éviter le contournement des seuils en période de crue, il est nécessaire de prévoir des protections de berges à l'amont et à l'aval en terrain meuble (de 2 à 5 m à l'amont, de 10 à 30 m à l'aval) sous forme d'enrochements composés de "tout-venant" de carrière d'au moins 300 mm de diamètre.

Dans les cas d'aménagement de seuils à des fins fauniques (figure 5.3), une fosse de dissipation d'énergie ayant une profondeur d'eau égale à la hauteur du seuil doit être construite. Cette fosse permet aux poissons de s'approcher à la base du seuil et de franchir ce dernier sans problème.

Fait important à noter, la crête du seuil doit être concave en son centre pour permettre aux poissons de circuler même en période d'étiage.

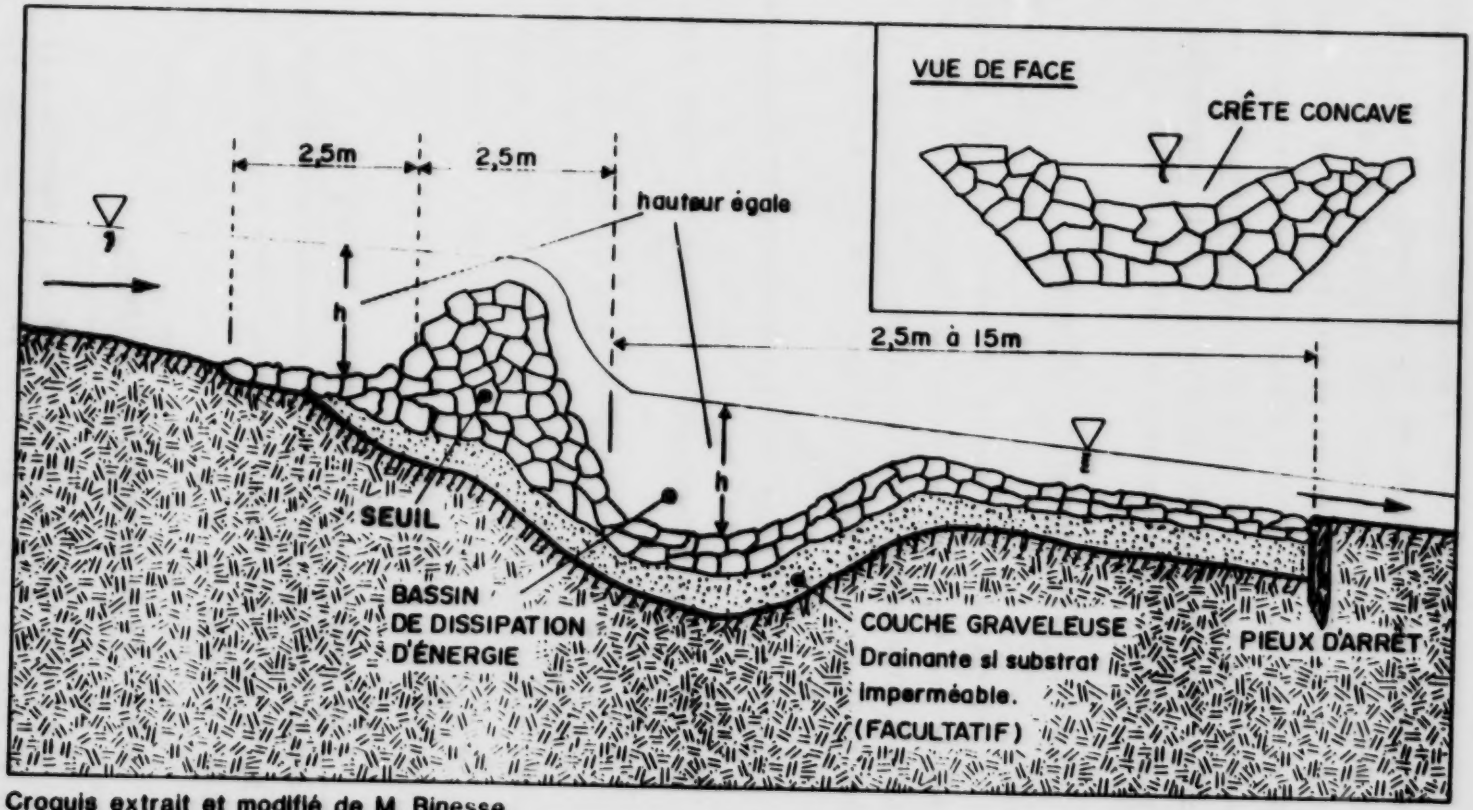
5.3.9 Aménagement de fosses à sédimentation

Les rives non protégées d'un cours d'eau recalibré présentent un risque de friabilité et une sensibilité à l'érosion plus prononcée que la normale. La perte du couvert herbacé et la vitesse accrue de l'eau sont les deux principaux facteurs qui accroissent l'érosion et le transport de sédiments.

Pour pallier cette fragilité mécanique des sols fraîchement remaniés, la fosse de sédimentation est une solution compensatoire permettant de bloquer dans des endroits stratégiques l'exportation du matériel décroché par l'eau.

Figure 5.3

SEUIL EN ENROCHEMENT POUR DES FINS FAUNIQUES (SALMONIDÉS)



Croquis extrait et modifié de M. Binesse.
Protection et amélioration des cours d'eau, 1983.

Le nombre de fosses, leur dimension et leur disposition dans le cours d'eau doivent être en étroite relation avec la friabilité des sols constituant les berges du cours d'eau ainsi qu'avec la nature et la localisation de sites à protéger de l'ensablement. Ainsi, dans les cours d'eau où les berges sont composées de matériaux pulvérulents (sable et matériel fin), le nombre de fosses devrait être évalué en fonction de la quantité du matériel susceptible d'être arraché et transporté en aval. De plus, les fosses peuvent être soit **temporaires** dans les secteurs où l'érosion est modérée et provisoire, soit **permanentes** dans les secteurs où l'érosion est importante et difficile à contrôler.

5.3.9.1 Fosse temporaire à sédiments

Les fosses temporaires à sédiments sont des fosses qui sont implantées en aval des travaux uniquement pendant la durée de ceux-ci. Elles doivent être aménagées au tout début des travaux à la limite inférieure de la zone aménagée ou en amont d'un site à protéger.

Plusieurs modèles de fosses temporaires peuvent être aménagés:

- par surapprofondissement du fond du cours d'eau (figure 5.4);
- par excavation du fond du cours d'eau et création d'un seuil temporaire en sacs de sable pour ralentir la vitesse (figure 5.5). Dans ce cas particulier, il faut prévoir un retour ultérieur pour rétablir la ligne de fond projeté et enlever le seuil temporaire.

L'aménagement de petites fosses temporaires à l'embouchure de chaque branche est aussi à conseiller dans les bassins versants à forte pente; le cours d'eau principal est ainsi mieux protégé contre les sédiments de ses tributaires.

5.3.9.2 Fosse permanente à sédiments

Le site d'implantation d'une fosse permanente à sédiments doit être choisi dans un secteur du cours d'eau qui présente les conditions suivantes:

Figure 5.4

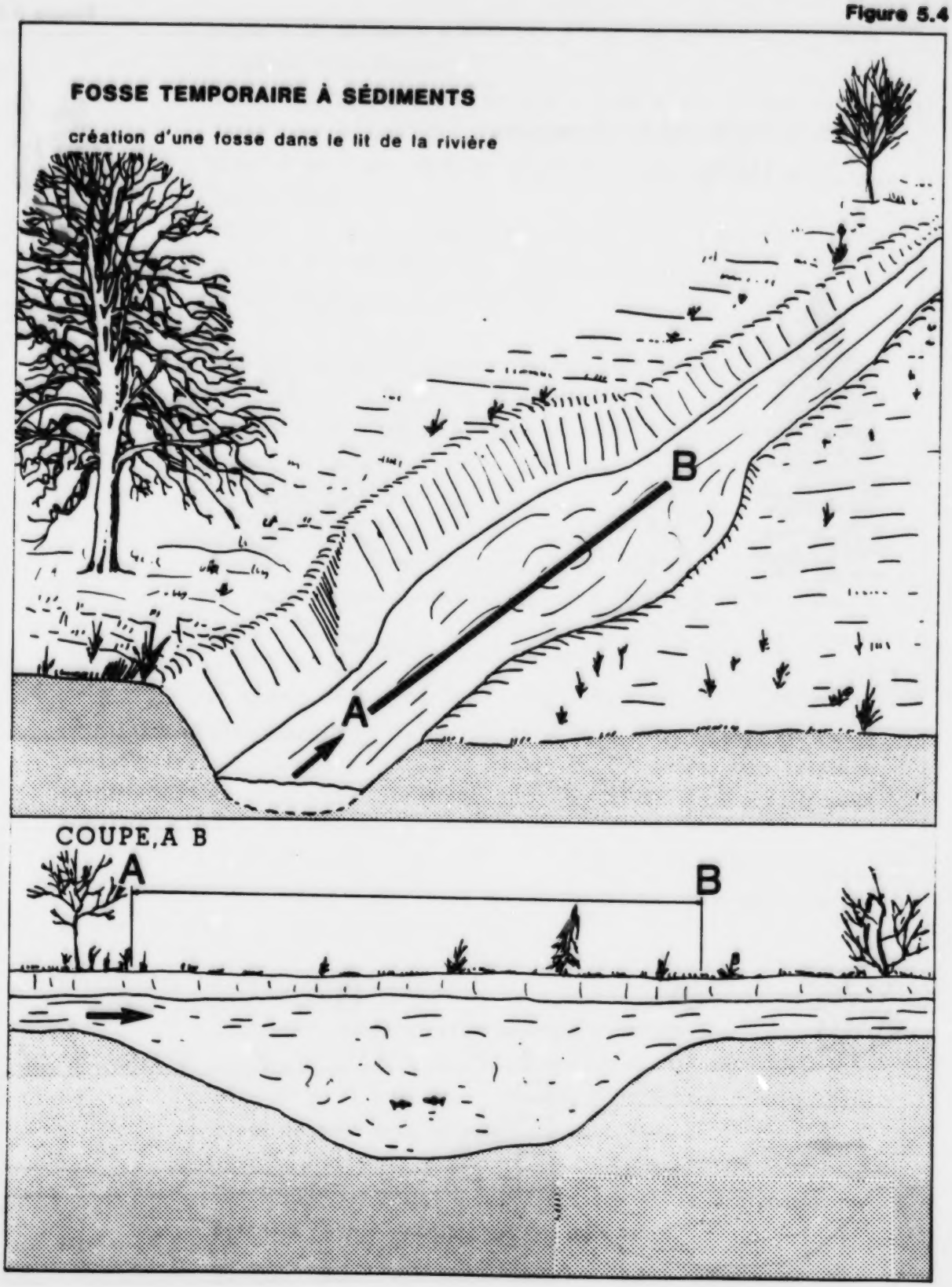
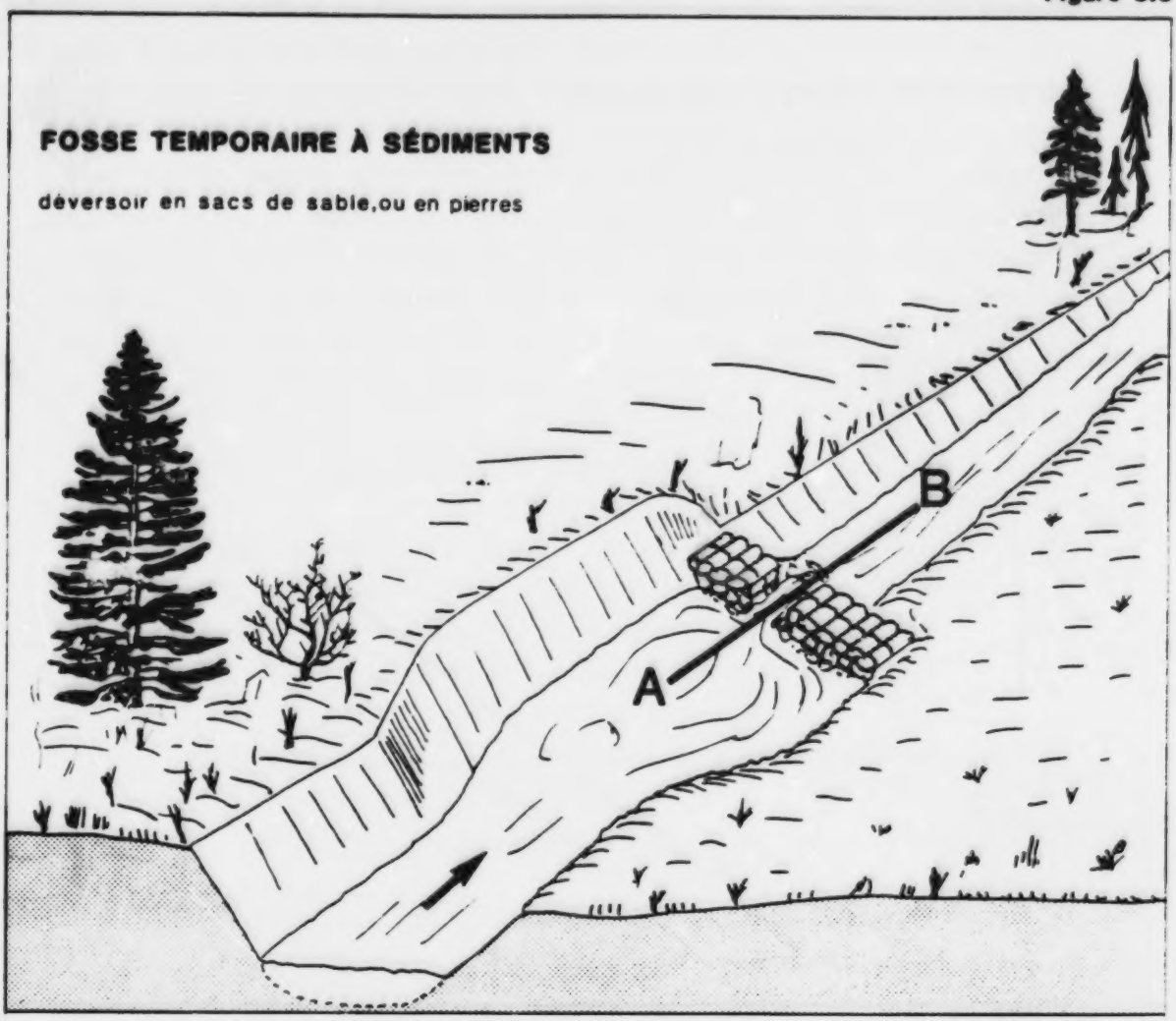
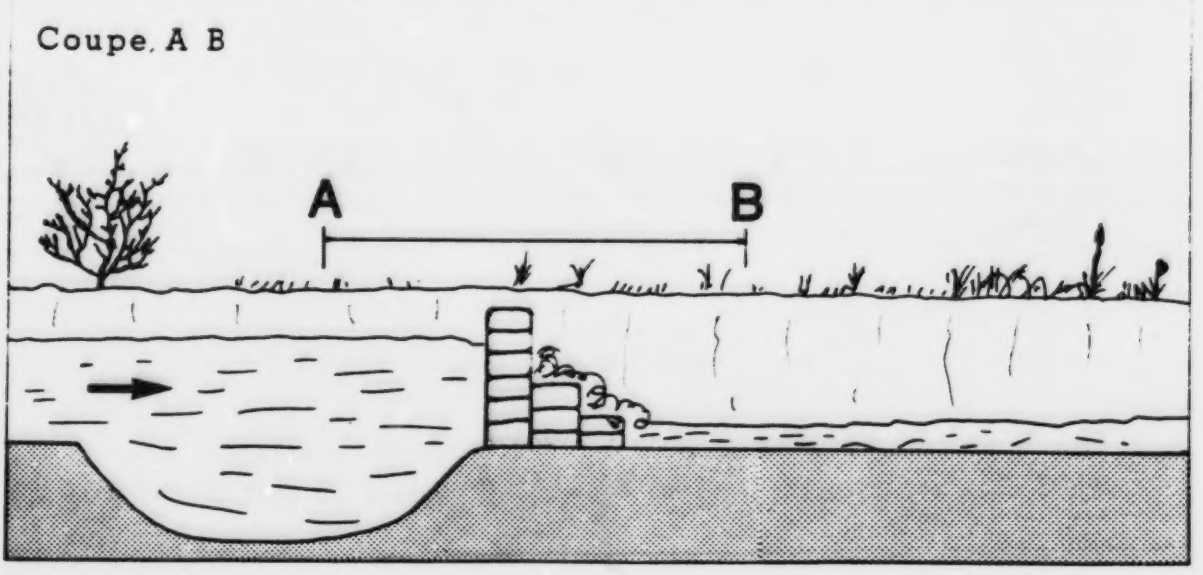

FOSSE TEMPORAIRE À SÉDIMENTS
création d'une fosse dans le lit de la rivière
A
B
COUPE, A B
A
B

Figure 5.5


FOSSE TEMPORAIRE À SÉDIMENTS
déversoir en sacs de sable,ou en pierres
A
B


Coupe, A B
A
B

- secteur où la pente est faible et/ou les sédiments ont déjà tendance à se déposer;
- secteur où le lit majeur du cours d'eau a une largeur suffisante pour y aménager d'une part la fosse à sédiments et d'autre part une aire de dépôt pour les déblais extraits (voir figure 5.6);
- secteur où le transport des déblais peut s'effectuer sans occasionner de préjudices aux terres agricoles situées à proximité du site d'extraction.

Le taux de sédimentation étant en relation directe avec la chute de vitesse du courant, la fosse de sédimentation doit offrir un volume suffisamment important pour créer un ralentissement des eaux et une déposition des sédiments. La largeur et la profondeur de la fosse devraient donc être déterminées en fonction de:

- la chute de vitesse du courant à cet endroit;
- la quantité de sédiments qui doit être extraite du cours d'eau.

Après chaque crue importante, une inspection de la fosse est nécessaire pour déterminer si un nettoyage s'impose. Les sédiments seront extraits, déposés sur le site choisi et ils seront par la suite transportés aux endroits déterminés par le surveillant des travaux (figure 5.6).

Pour dimensionner une fosse de sédimentation, on propose la démarche suivante:

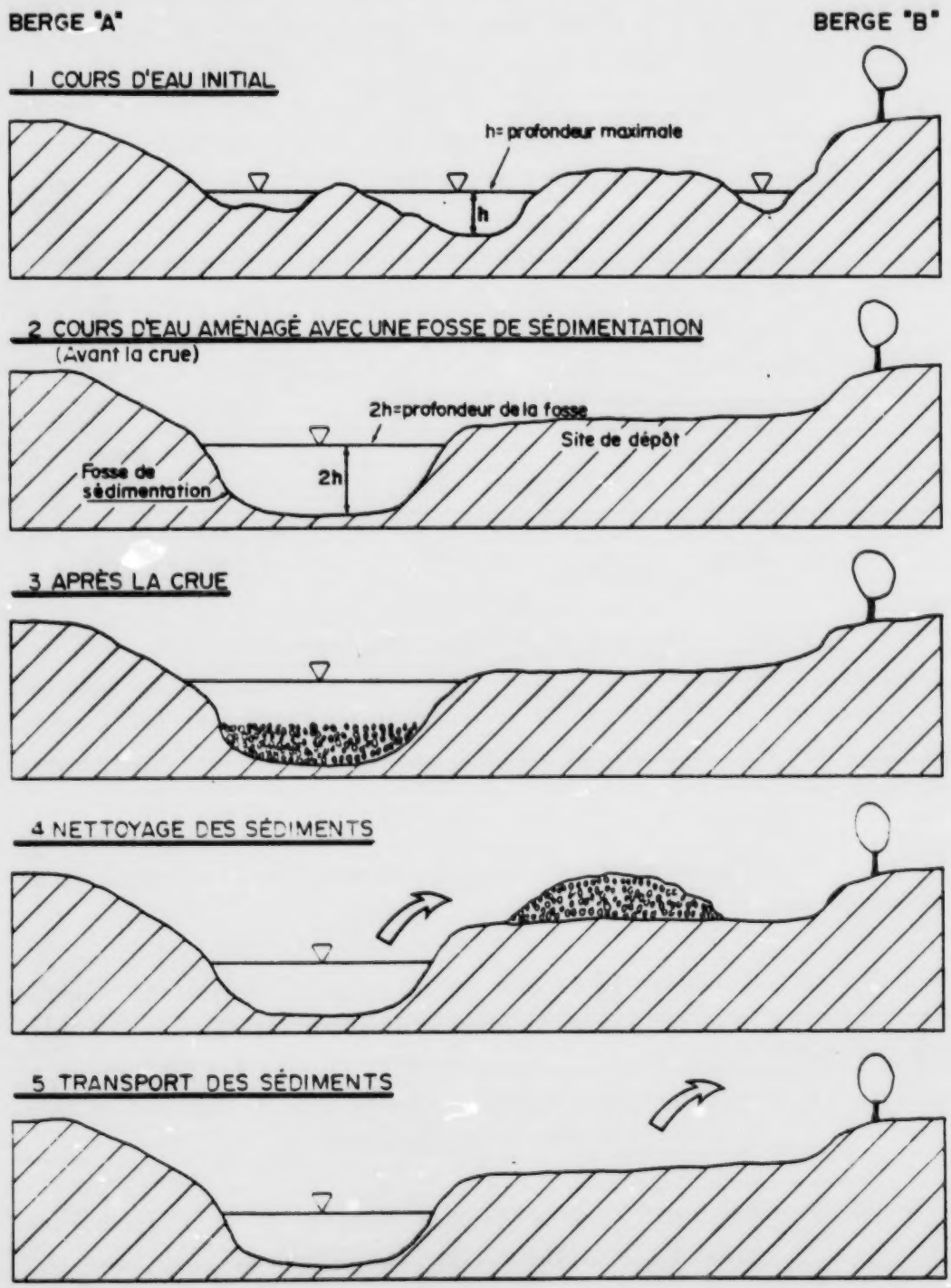
1. déterminer la largeur et la longueur nécessaires pour intercepter les particules du diamètre désiré;

2. déterminer la profondeur requise pour mettre fin au charriage de fond dans le cours d'eau;

3. déterminer la capacité d'entreposage et la profondeur nécessaire pour l'entreposage des sédiments.

Figure 5.6

FOSSE PERMANENTE DE SÉDIMENTATION



Le taux de déposition de sédiments est fonction de la vitesse de chute de la particule, de la longueur du bassin et du débit d'eau par unité de largeur du bassin.

Selon l'équation de Vetter* (1940),

$$\frac{W}{Wo} = - \frac{VsL}{e^{q}}$$

* (unités anglaises)

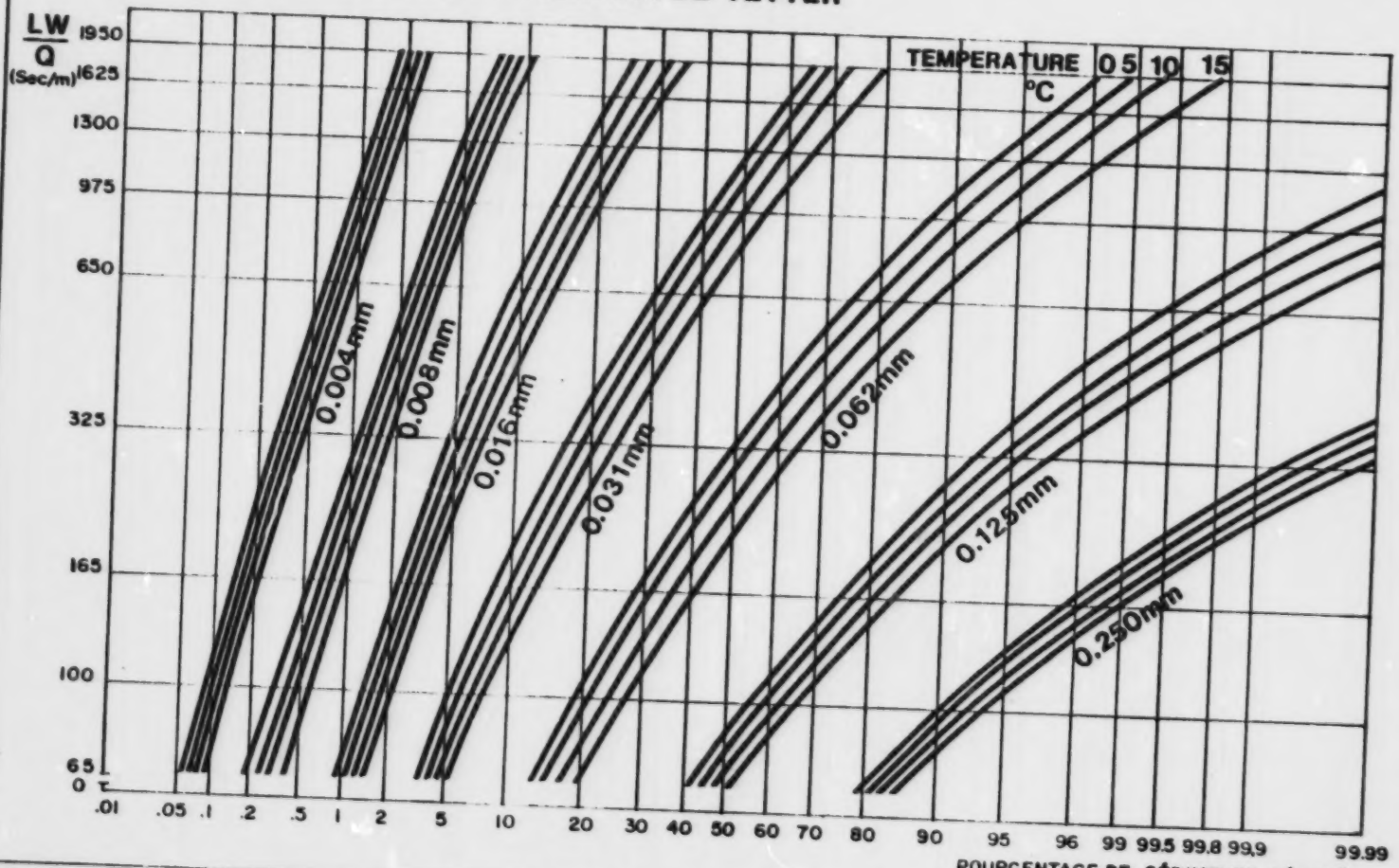
Wo : poids de sédiments pénétrant dans la fosse
W : poids de sédiments sortant de la fosse
L : longueur de la fosse
Vs : vitesse de chute de la particule
q : débit d'eau par unité de largeur de fosse
e : base des logarithmes népériens

La vitesse de chute Vs dépend du diamètre des particules et de la température de l'eau (la viscosité de l'eau augmente à mesure que la température baisse).

La figure 5.7, transformée au système métrique, sert à solutionner l'équation de Vetter: l'abcisse indique le pourcentage de sédiments entrant qui sont interceptés et l'ordonnée tient compte des données géométriques (L = longueur et W = largeur) et du débit du cours d'eau (Q). À mesure que la largeur ou la longueur augmentent, le terme LW/Q augmente et le pourcentage de sédiments captés augmente d'autant.

Figure 5.7

SOLUTION GRAPHIQUE DE L'ÉQUATION DE VETTER



Source : Edvard A. Hansen

Par contre, elle est peu efficace pour enlever la fraction fine des sédiments, à moins de construire des fosses très longues et ayant besoin d'entretien périodique.

Avant d'entreprendre tout aménagement de cette nature, on doit s'assurer que des bonnes mesures de lutte à l'érosion en amont du cours d'eau n'apporteront pas de meilleurs résultats. Investir dans la consolidation des berges vaut mieux qu'investir dans la récupération de sédiments. Il faut donc choisir la solution jugée la plus acceptable.

5.3.10 Enrochement et gabion

Les secteurs sensibles érodés par des vitesses d'eau élevées ou par les glaces seront protégés au moyen d'enrochement. Les courbes prononcées sont particulièrement sollicitées.

L'enrochement recommandé est constitué de pierres, préférablement angulaires, de 150 à 600 mm de diamètre. La diversité des diamètres assure une meilleure stabilité. La mise en place et la compaction devraient s'effectuer au moyen d'une pelle hydraulique.

L'enrochement est particulièrement recommandé pour stabiliser le bas de talus dans les cours d'eau à fond et talus sableux.

Les gabions sont utilisés lorsqu'on doit consolider un talus très abrupt ou un mur vertical et lorsque des ponceaux ou des propriétés privées sont menacées.

La repousse de la végétation à travers le gabion est plus difficile et le coût des gabions est environ 3 fois plus élevé que le coût d'un empierrement conventionnel.

5.3.11 Ensemencement des talus

L'ensemencement des berges de cours d'eau mises à nu après leur aménagement consiste à semer des espèces pionnières, des graminées surtout mais aussi des légumineuses. La revégétation des talus a principalement pour but d'empêcher leur dégradation lente ou rapide, de nuire à l'établissement des mauvaises herbes et de protéger les eaux de la contamination directe des polluants agricoles (pesticides et engrais).

5.3.11.1 Pour les surfaces agricoles

A- Date de l'ensemencement

D'une façon générale, l'ensemencement doit être fait le plus tôt possible après l'excavation du cours d'eau durant la saison de croissance, soit de la fin avril au début de septembre dans la région de Montréal, du début mai à la fin d'août dans la région de Québec et du début mai à la mi-août dans les régions plus septentrionales. Il est important d'effectuer le semis peu de temps après le creusage du cours d'eau, afin que les plantes s'établissent le plus rapidement possible pour stabiliser le talus, mais aussi avant que les mauvaises herbes n'envahissent le milieu. Les graminées ensemencées à la fin de l'été connaissent un développement rapide et important au printemps suivant. Il est préférable, lorsque c'est possible, d'effectuer le semis à la fin de l'été plutôt que d'attendre au printemps suivant.

B- Taux de semis

Un taux de semis de 80 à 120 kg/ha devrait être utilisé dans la majorité des cas. Ce taux de semis peut donner des résultats variables selon la nature du sol et la technique d'ensemencement utilisée (voir la section traitant des techniques d'ensemencement).

C- Choix des espèces et composition des mélanges

Pour l'établissement d'un couvert herbacé, il convient de choisir des espèces d'établissement rapide et aptes à contrer l'érosion. Aussi les espèces qui développent un système radiculaire vigoureux près de la surface mais également en profondeur doivent être privilégiées. Il importe aussi de choisir des plantes qui ne soient pas trop envahissantes et qui risquent de nuire aux cultures avoisinantes (agropyres, élyme d'aital, élyme de Russie et brome inerme).

Il n'existe pas de mélange d'espèces qui convienne parfaitement à tous les sols et tous les climats. Toutefois, certaines plantes peuvent se développer dans des conditions de faible fertilité du sol, dans des milieux secs ou humides et bien survivre à l'hiver.

Il importe de limiter le nombre d'espèces à 3 ou 4. Les plantes sur les berges peuvent être inondées, au printemps ou suite à des précipitations abondantes, ou subir des conditions sèches à cause du drainage excessif de l'eau au bas des talus. Certaines graminées, la fétuque rouge traçante, la fétuque durette Reliant et les agrostides blanche et Highland, résistent bien à ces conditions. La fétuque rouge traçante semble être l'espèce la mieux adaptée aux conditions adverses et de faible fertilité (sables). D'autres graminées (pâturin des prés et du Canada) ou des légumineuses (trèfle, trèfle blanc, coronille et lotier corniculé) peuvent être ajoutées au mélange dans de faibles proportions. La coronille et le lotier risquent peu de s'établir convenablement et de survivre à l'hiver, ailleurs que dans le sud-ouest de la province. Finalement, le raygrass vivace, dont l'établissement est rapide, est mélangé aux autres semences dans une proportion d'environ 10%, pour servir de plante-abri.

	Espèces	Composition (%)
(1)	. Fétuque rouge traçante	45
	. Agrostide blanche ou Highland	45
	. Raygrass vivace	10
(2)	. Mélange québécois ou à voirie	
	. Fétuque rouge traçante	50
	. Pâturin des prés	10
	. Agrostide blanche	20
	. Raygrass vivace	20

Plusieurs mélanges de semences déjà préparés, vendus sous l'appellation de "mélange québécois ou à voirie", incluent les mêmes espèces dans des proportions différentes avec parfois une légumineuse. Il est avantageux de choisir le mélange qui comporte à la fois une grande proportion de fétuque rouge traçante et plus d'agrostide que de pâturin. En second lieu, une proportion d'environ 10% de raygrass vivace est également souhaitable.

D- Technique d'ensemencement

Trois types d'ensemencement sont actuellement utilisables; le semis à la volée, le semis mécanisé et le semis utilisant un système hydraulique de dispersion.

1) Semis à la volée

L'utilisation du semis à la volée peut donner de bons résultats lorsque les berges ne sont pas trop lisses et abruptes. Dans plusieurs cas un semis fait à la main ou à l'aide d'un semoir CYCLONE permet à une quantité suffisante de graines de germer pour donner un bon couvert végétal. Il est cependant fréquent qu'une certaine quantité de graines

soient entrainées au bas du talus. Dans de telles conditions, il est avantageux de strier les talus mécaniquement avec un outil similaire à une herse à finir. Cette opération doit être effectuée peu de temps après l'excavation, lorsque le sol est frais et humide, avant ou après l'ensemencement. L'ensemencement à la volée peut être utilisée pour tous cours d'eau, indépendamment de leur accessibilité et de l'environnement immédiat.

2) Semis mécanisé

Cette méthode consiste à épandre des semences à l'aide des semoirs calibrés à cette fin. Par exemple, un semoir porté à dos d'homme et activé par un petit moteur, peut être utilisé pour projeter des graines sur des talus.

3) Semis hydraulique

La méthode d'ensemencement hydraulique (hydrosemence) peut permettre la prise de la végétation sur des talus abruptes et lisses. Les semences mélangées à une pâte fibreuse sont dispersées sur la surface à ensemencer avec un système hydraulique. Le paillis est fabriqué à partir de fibres de bois ou de toutes autres fibres organiques. Sur les pentes fortes, un additif collant, de type Benovert ou équivalent, permet d'obtenir de meilleurs résultats. Cependant, en milieu agricole, il est souvent difficile de recourir à cette technique. En effet, le camion à partir duquel le paillis est appliqué sur les talus, ne peut traverser les fossés de drainage transversaux ou les clôtures. De plus, sur les sols argileux, la germination et le développement des espèces sont apparues plus lents qu'avec un ensemencement fait à la volée.

E- Implantation d'arbustes

Il pourrait être avantageux comme mesure de protection ou de restauration des rives de planter des arbustes dans une bande riveraine. Il s'agit d'aménagement plus complexes, qui risquent davantage de s'établir en bordure des cours d'eau naturels et de leurs affluents qu'en bordure des cours d'eau agricoles. On craint que ces espèces viennent obstruer les cours d'eau ou les systèmes de drainage souterrain. Aussi, l'implantation d'espèces arborescentes dans une bande aux abords de cours d'eau en milieu agricole doit être bien soupesée avant d'être prescrite.

5.3.11.2 Pour les surfaces boisées

En milieu boisé, il convient souvent de s'inspirer des espèces végétales présentes dans le milieu pour l'établissement ou la restauration du couvert végétal dans une bande de protection.

Lorsque le sol a été mis à nu, l'ensemencement avec des espèces végétales herbacées constitue souvent un moyen rapide de stabiliser le sol et ainsi favoriser un meilleur établissement des espèces arbustives et arborescentes.

En plus des espèces végétales présentes dans le milieu, le choix d'espèces herbacées, arbustives et arborescentes à considérer dans une bande de protection en milieu boisé est souvent plus grand qu'en milieu agricole.

Toute plantation doit permettre la circulation éventuelle de machinerie pour l'entretien du cours d'eau.

Tout comme en milieu cultivé, le choix des espèces végétales devrait être fait de façon à ce que la végétation ne vienne pas ultérieurement obstruer le cours d'eau et ne soit pas envahissante (afin d'éviter d'avoir à entreprendre ultérieurement des travaux d'entretien sur cette végétation).

Espèces arbustives suggérées pour les berges en milieu forestier: Cornouiller stolonifère, spirée à larges feuilles, spirée blanche, spirée tomentueuse, myrique baumier, myrique de Pennsylvanie, chèvrefeuille dioïque, physocarpe à feuilles d'aubier, vigne vierge, gadellier doré, églantier, rosier du fleuve Saint-Jean, rosier rugueux, ronce odorante, sureau blanc, shepherdie, sorbaria, viorne trilobé, viorne cassinoïde, potentille fructescente, etc. D'autres espèces naturelles adaptées aux conditions du milieu et souvent retrouvées sur place peuvent aussi s'ajouter. Par contre les aulnes et les saules ont souvent tendance en se développant à venir obstruer les rives et leurs abords, ce qui peut être problématique sur bien des sections de cours d'eau en milieu agricole.

5.3.12 Confection du profil en long en fonction de la faune aquatique

L'aménagement de cours d'eau entraîne généralement un reprofilage en long du cours d'eau qui uniformise le fond du cours d'eau.

Ce reprofilage du fond du cours d'eau provoque le plus souvent la disparition des fosses où les poissons se nourrissent et se reposent ainsi que des rapides qui assurent l'oxygénation de l'eau.

Lors de la conception du projet de réfection, on a le choix d'une part de maintenir dans certains secteurs des fosses et des rapides naturels ou d'autre part de redonner, après les travaux, un fond accidenté permettant le maintien de l'habitat pour la faune aquatique. L'aménagement de petits seuils en enrochement, de fosses de profondeur approximative de 1 mètre, ainsi que de légères cascades là où la pente le permet sont tous autant de moyens de renaturaliser le profil en long d'un cours d'eau.

5.3.13 Dégagement végétal léger

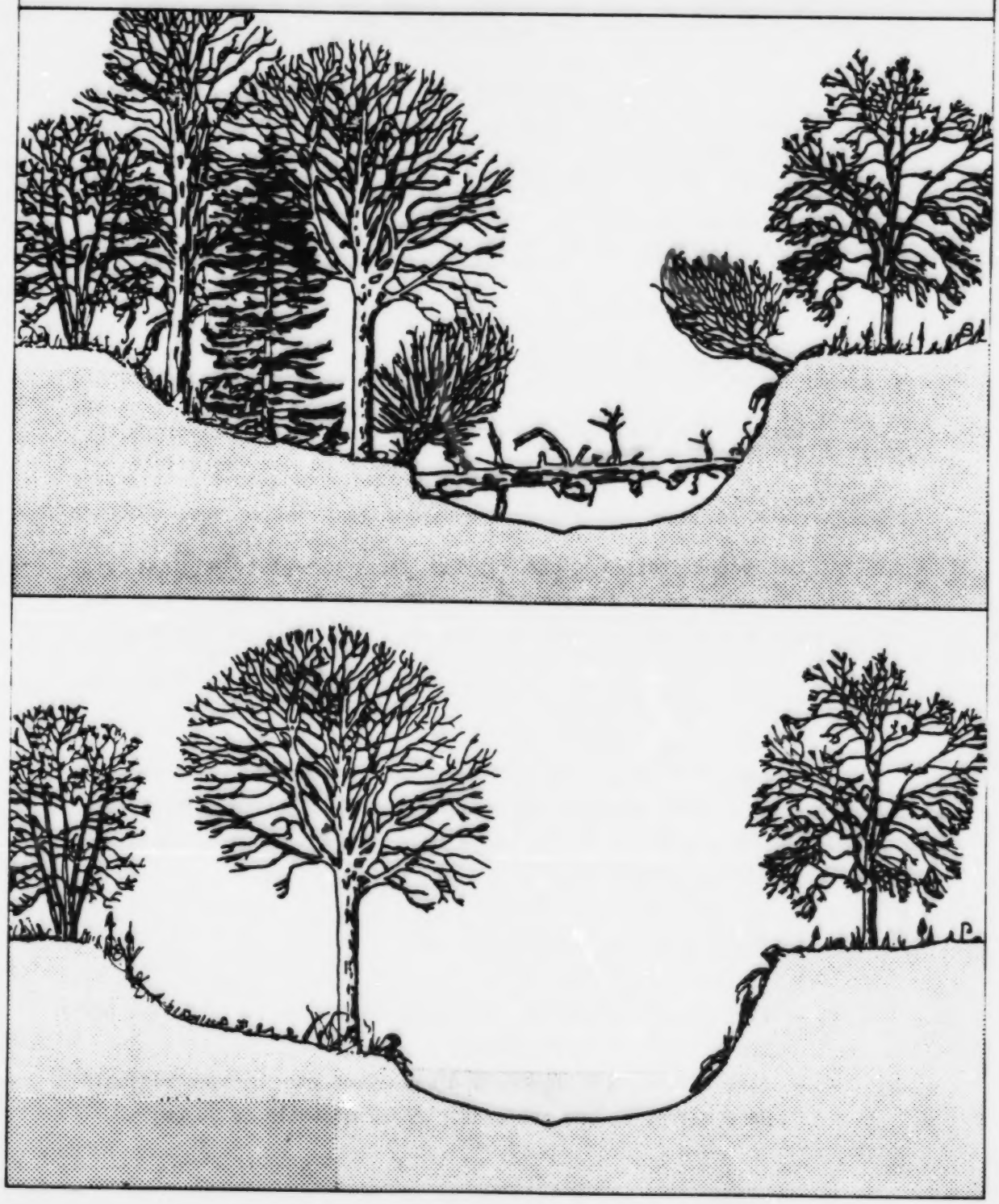
Le dégagement végétal léger consiste à couper et tailler, après sélection, les arbustes, les branches et parfois même les arbres qui envahissent le lit du cours d'eau et obstruent le libre écoulement des eaux. La conservation de troncs solidement ancrés peut être à conseiller s'ils assurent la stabilité de la berge.

Le dégagement végétal léger permet l'amélioration de l'écoulement des eaux et réduit au minimum les impacts physiques. Cette intervention permet de conserver les berges et le fond du cours d'eau dans le même état de stabilité qu'en condition naturelle. Elle augmente quelque peu le débit de pointe à cause de la réduction du frottement qui était auparavant causé par la présence d'arbres, d'arbustes ou l'accumulation de débris végétaux (figure 5.8).

Compte tenu que cette action est sélective et manuelle, l'impact sur le milieu faunique est réduit et l'habitat est moins perturbé parce que le fond et les berges du cours d'eau demeurent intacts.

FIGURE 5.8

DÉGAGEMENT VÉGÉTAL LÉGER



5.3.14 Déchiquetage en copeaux

La technique habituellement employée pour éliminer les branchages, arbustes et arbrisseaux est le brûlage en tas.

Dans les secteurs forestiers et les secteurs agricoles, l'emploi d'une déchiqueteuse pour réduire la matière ligneuse en copeaux est une alternative intéressante, car cette technique permet de conserver la matière organique et de l'incorporer au milieu et ainsi d'éliminer les risques d'incendies pendant les sécheresses. Le compostage du bois raméal permet de recycler une ressource qui serait perdue autrement.

5.3.15 Aménagement de frayères

Lors de l'aménagement d'un cours d'eau, il peut arriver qu'une frayère soit affectée par les travaux de creusage ou par les effets des travaux (ensablement dû à l'érosion excessive).

La reconstitution d'une frayère dans son état original est difficile lorsqu'un cours d'eau a été recalibré car ce dernier a subi des modifications par la nature même des travaux. Il est donc préférable, dans ce cas, de réaménager une frayère dans un secteur en amont des travaux, là où le cours d'eau est propice à ce type d'aménagement.

Compte tenu des particularités qui entourent l'aménagement d'une frayère, il est préférable de consulter un spécialiste du ministère du Loisir de la Chasse et de la Pêche pour obtenir un avis technique approprié.

De façon générale, une frayère doit:

- être localisée dans un milieu où la végétation offre un bon couvert sur le cours d'eau;
- être située dans un cours d'eau ayant une largeur minimale de 2 mètres et une profondeur d'eau minimale de 30 cm;

- être aménagée dans un cours d'eau où les qualités physico-chimiques des eaux auront été vérifiées;
- être constituée de graviers qui permettent la déposition des oeufs et une bonne oxygénation par la percolation interne dans le cas des salmonidés.

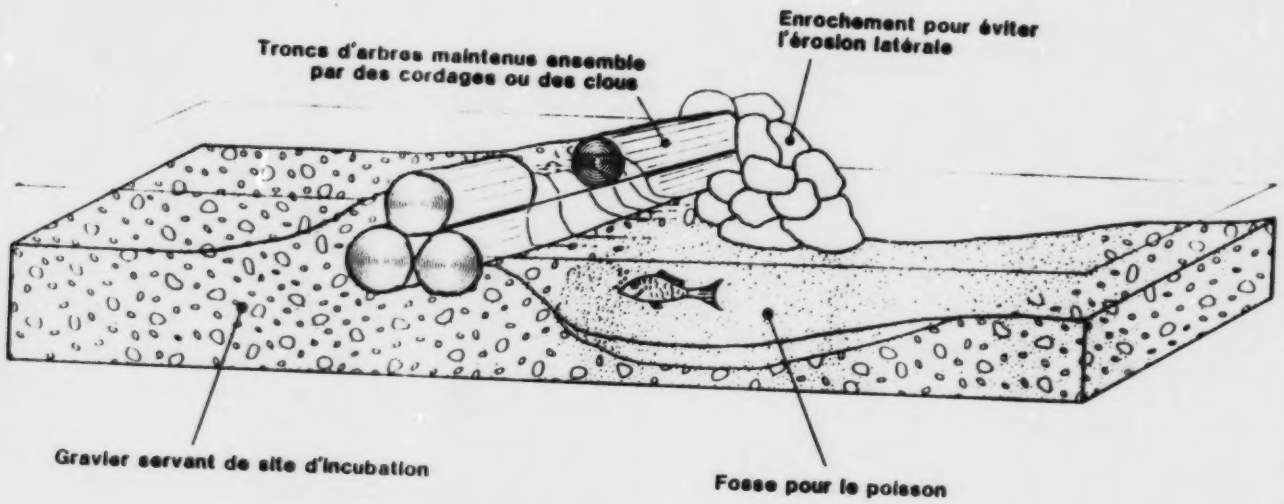
L'aménagement d'une frayère doit être exécuté en respectant au maximum l'intégrité du milieu. L'utilisation d'une machinerie lourde, entre autres pour transporter et installer des blocs de rocs, entraîne le déboisement d'une partie d'une rive. Il est conseillé de procéder manuellement ou avec une machinerie de petite envergure (tracteur de ferme, etc.).

Plusieurs types d'aménagement peuvent être préconisés pour implanter une frayère. On peut créer un petit seuil à l'aide de troncs de cèdre de manière à forcer l'accumulation d'un banc de gravier en amont et une fosse en aval (voir figure 5.9). Les troncs sont solidement fixés ensemble et ancrés dans les deux rives avec des pieux. Chaque rive est enrochée pour éviter tout contournement par les eaux et l'arrachement éventuel du seuil.

Là où la pente le permet, l'aménagement de plusieurs petits seuils en escalier augmente la capacité de support pour le frai du poisson et constitue une mise en valeur importante du cours d'eau.

FIGURE 5.9

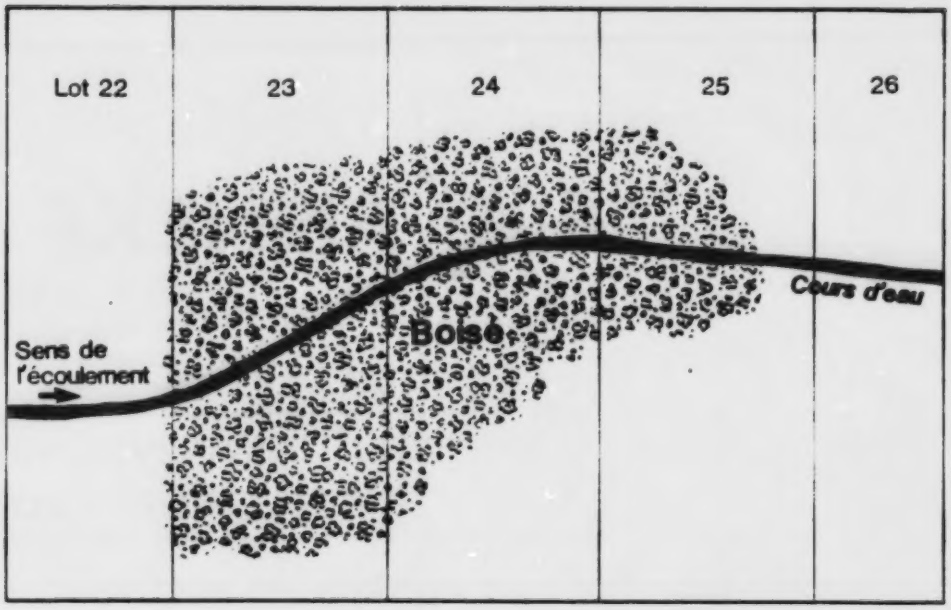
AMÉNAGEMENT DE FRAYÈRES A L'AIDE DE SEUILS (TRONCS)
VUE EN COUPE



5.4 ANNEXE 1

EXEMPLES D'INTERVENTIONS EN MILIEU BOISÉ

5.4 EXEMPLES D'INTERVENTIONS EN MILIEU BOISÉ



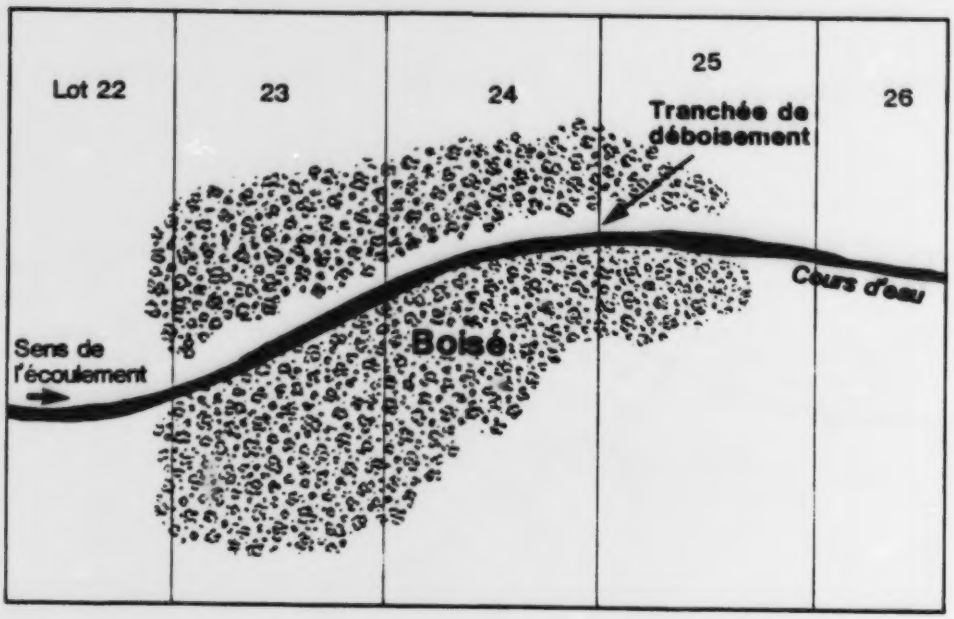
5.4.1 Problématique:

Il arrive parfois qu'il soit nécessaire d'aménager un cours d'eau dans un secteur boisé intercalé dans une zone agricole.

Compte tenu que les impacts des travaux dans les milieux boisés sont toujours majeurs, il est primordial de porter une attention particulière aux valeurs sectorielles afin de bien choisir les types d'interventions qui assurent d'une part l'égouttement désiré et d'autre part le maintien du maximum des qualités intrinsèques des milieux.

Diverses solutions sont proposées dans les pages suivantes.

5.4.2 Option 1: déboisement sur une rive

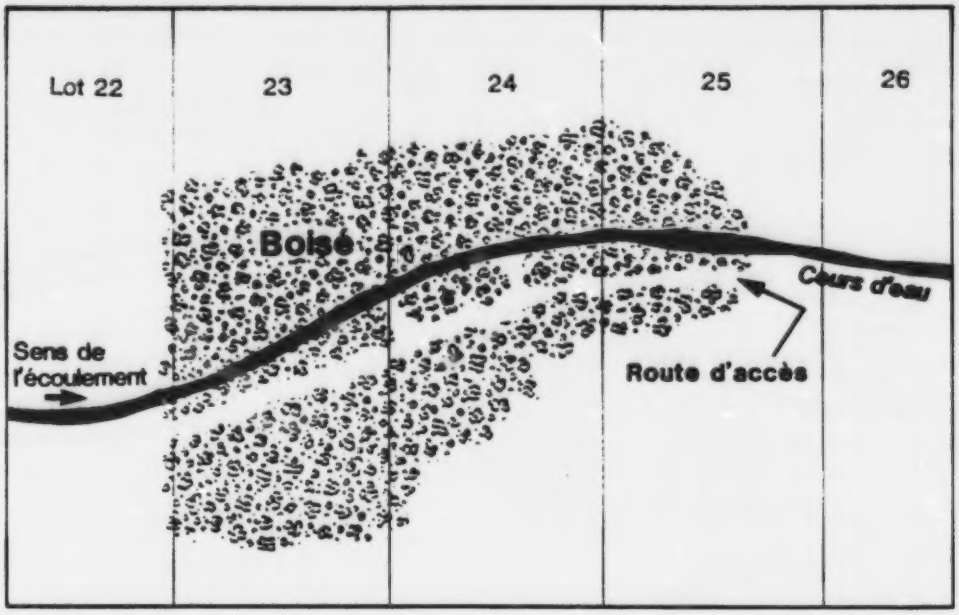


Lorsqu'il est nécessaire d'aménager un cours d'eau dans un boisé, le déboisement doit s'effectuer sur une seule rive du cours d'eau de manière à maintenir le maximum du couvert végétal aux abords de ce dernier.

Il est préférable de déboiser la rive nord du cours d'eau car la végétation sur la rive sud joue le rôle d'écran thermique. De cette manière, le cours d'eau profite d'un meilleur ombrage, ce qui évite un réchauffement excessif des eaux.

De plus, l'extraction et l'épandage des déblais doivent s'effectuer de manière à maintenir une berme de trois (3) mètres exempte de déblais ou de tous débris qui pourraient entraver la repousse de la végétation riparienne et riveraine.

5.4.3 Option 2: nettoyage végétal léger:

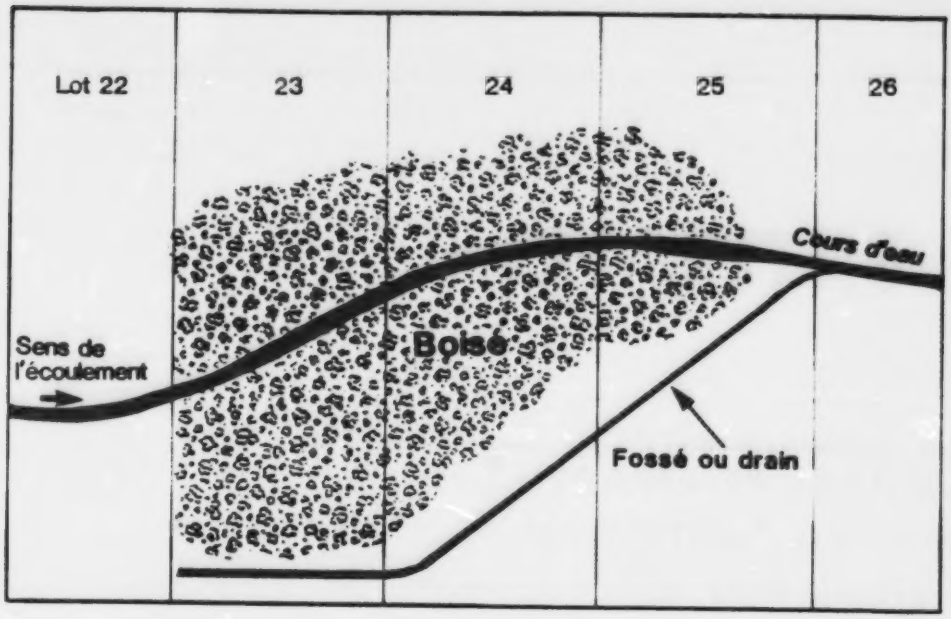


Lorsque la capacité d'évacuation du lit existant est jugée suffisante pour évacuer les eaux et que les seuls obstacles à l'écoulement sont des débris végétaux, le nettoyage végétal léger constitue la meilleure solution d'intervention.

La première étape consiste à délimiter et à aménager une voie d'accès en retrait du cours d'eau à une distance d'au moins 10 mètres de ce dernier. Cette voie d'accès peut présenter une ou plusieurs ouvertures sur le cours d'eau de manière à assurer une approche directe pour la machinerie légère (tracteur de ferme, etc.).

La seconde étape consiste à exécuter le nettoyage lui-même du cours d'eau en prenant soin d'éliminer uniquement la végétation et les débris végétaux qui constituent un obstacle au libre écoulement des eaux. Toute végétation surplombante au cours d'eau qui n'entrave pas l'écoulement doit être maintenue en place. De plus, lors de ce nettoyage, il est important de conserver les souches qui sont bien ancrées dans le talus car elles assurent une meilleure stabilité des rives.

5.4.4 Option 3: drainage latéral au boisé:



Lorsqu'il est nécessaire de drainer des terres agricoles localisées de part et d'autre d'un boisé à protéger (exemple ci-contre: lot 23, lot 24 et lot 25), l'installation d'un drain collecteur ou le creusage d'un fossé latéral sont les deux solutions qui doivent être préconisées.

Le drainage de terres peut ainsi s'effectuer sans qu'il soit nécessaire de réaménager toute la section du cours d'eau dans sa partie boisée.

CHAPITRE 6

OUVRAGES ET PRATIQUES PERMETTANT D'ASSURER LA DURABILITÉ DE L'AMÉNAGEMENT

CHAPITRE 6

OUVRAGES ET PRATIQUES PERMETTANT D'ASSURER LA DURABILITÉ DE L'AMÉNAGEMENT

		Page
6.1	Protection d'une berme	6-4
6.1.1	Travaux d'aménagement	6-4
6.1.2	Remise en culture	6-5
6.2	Accès des animaux	6-5
6.3	Les ponceaux	6-8
6.3.1	Définition	6-8
6.3.2	Hydraulique des ponceaux	6-8
6.3.2.1	Types d'écoulement et calcul de la section	6-8
6.3.2.2	Utilisation des courbes de performance	6-14
6.3.2.3	Considérations dans le choix final du ponceau	6-20
6.3.3	Types de structures ou de ponceaux	6-22
6.3.3.1	Calculs structuraux	6-22
6.3.3.2	Mise en place	6-23
6.3.4	Protection du ponceau	6-24
6.3.4.1	Mur de tête	6-24
6.3.4.2	Protection contre l'érosion ou l'affouillement	6-24
6.3.4.3	Sédimentation au niveau du ponceau	6-25
6.4	L'entretien des cours d'eau	6-25
6.5	Annexe 1: Exemple de dimensionnement d'un ponceau	6-29

LISTE DES FIGURES

		Page
6.1	Clôturage des pâturages avec accès au cours d'eau	6-6
6.2	Clôturage des pâturages (vue en surplomb)	6-7
6.3	Contrôle à l'entrée	6-10
6.4	Contrôle à la sortie avec sortie non submergée	6-12
6.5	Contrôle à la sortie avec sortie submergée	6-13
6.6	Courbes de performance: contrôle à l'entrée	6-15
6.7	Courbes de performance: contrôle à l'entrée	6-16
6.8	Courbes de performance: contrôle à l'entrée	6-17
6.9	Courbes de performance: contrôle à l'entrée	6-18
6.10	Courbes de performance: contrôle à l'entrée	6-19
6.11	Choix du diametre d'un ponceau avec D = HW (contrôle à l'entrée)	6-21

6 OUVRAGES ET PRATIQUES PERMETTANT D'ASSURER LA DURABILITÉ DE L'AMÉNAGEMENT

Ce chapitre regroupe les interventions dites post-opératoires, c'est-à-dire les mesures à préconiser une fois que le cours d'eau est complètement aménagé.

Toutes les mesures décrites dans ces pages, telles la protection d'une berme, le clôturage des pâturages, l'installation des ponceaux appropriés, etc... sont essentielles pour assurer la pérennité des travaux et la protection de l'environnement.

Compte tenu que ces mesures constituent des suggestions s'adressant aux corporations municipales et aux agriculteurs, elles ont été regroupées dans ce chapitre.

6.1 PROTECTION D'UNE BERME

6.1.1 Travaux d'aménagement

Une berme est un espace de terrain localisé en bordure du cours d'eau, au sommet du talus et qui ne doit faire l'objet d'aucune intervention mécanique, de manière à conserver une zone tampon entre la berge et les déblais.

La largeur minimale de cette berme, lors de l'aménagement du cours d'eau, doit être de trois (3) mètres. Le rôle de cette berme est d'une part de maintenir la stabilité aux abords du cours d'eau et d'autre part de conserver un écran-filtre végétatif pour diminuer le transport de sédiments dû à l'érosion de surface.

Quoique sur cet espace le déboisement et l'élagage soient nécessaires pour permettre le passage et le travail de la machinerie, la berme doit être libre de tout déblai et ne pas être remaniée lors du régalage des déblais.

6.1.2 Remise en culture

Lors de la remise en culture, l'agriculteur doit maintenir une berme non remaniée de 3 mètres en bordure du cours d'eau. À l'exception du fauchage, aucune autre activité agricole majeure, incluant les travaux de labour, ne devrait être pratiquées sur cette berme afin de conserver les abords immédiats du cours d'eau dans les meilleures conditions de maintien. Cette berme a pour but d'assurer la stabilité des talus.

6.2 ACCÈS DES ANIMAUX

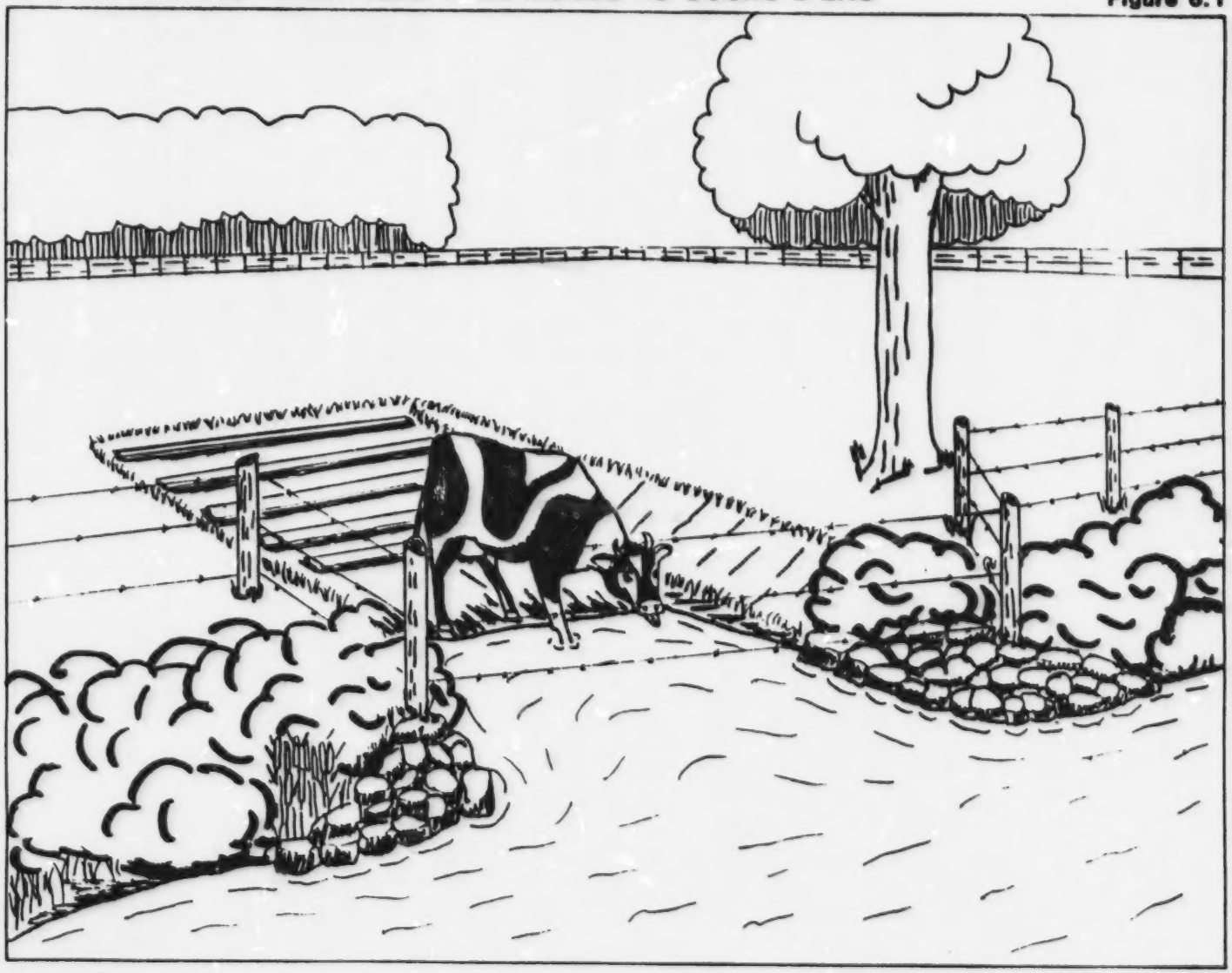
Les troupeaux qui ont accès directement au cours d'eau causent souvent des dégâts sur les abords et au fond du cours d'eau: piétinement et affouillement des berges, broutage du couvert végétatif et pollution des eaux par le fumier.

Dans un cours d'eau fraîchement restauré, les dégâts sont encore plus importants à cause de la grande fragilité des berges. Il est donc fortement recommandé que l'accès au cours d'eau soit interdit aux animaux par une clôture et que des rampes d'accès en gravier soient aménagées, de manière à permettre aux animaux d'aller s'abreuver dans des secteurs réservés à cette fin et cela, sans risque d'accidents (voir figures 6.1 et 6.2).

Afin d'amener l'eau aux animaux, on recommande également l'usage de pompes mécaniques conçues spécifiquement pour les pâturages.

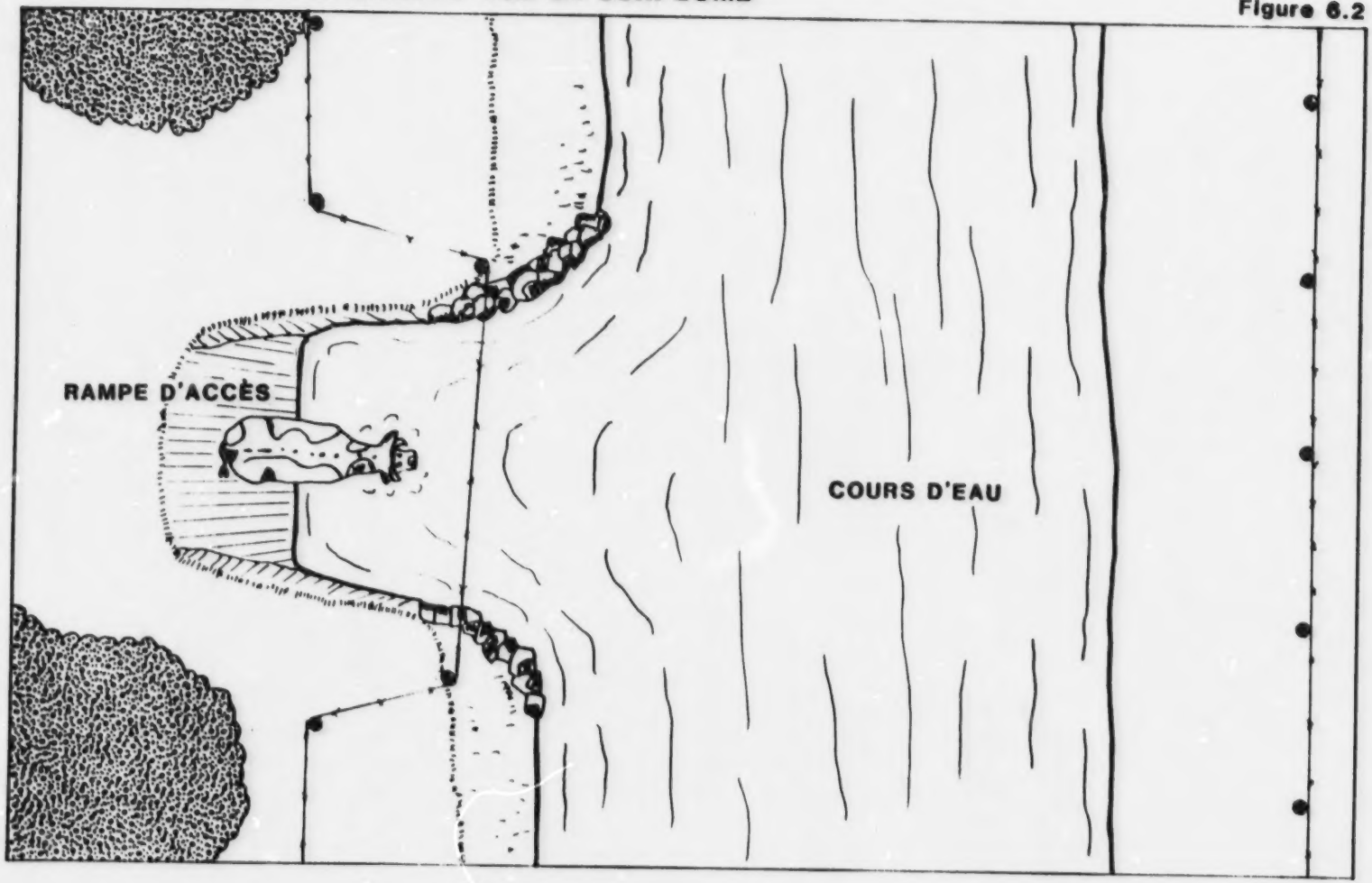
CLÔTURAGE DES PÂTURAGES AVEC ACCÈS AU COURS D'EAU

Figure 6.1



CLÔTURAGE DES PÂTURAGES VUE EN SURPLOMB

Figure 6.2



Une traverse à gué avec enrochement du fond et des talus, et des pentes minimales de talus de 1:5 permettent d'éviter l'affouillement du cours d'eau.

Ces mesures ont l'avantage de conserver le cours d'eau en meilleure condition et de prolonger sa vie utile.

6.3 LES PONCEAUX

6.3.1 Définition

Un ponceau est une structure hydraulique aménagée sur une voie d'eau en vue de permettre un libre passage aux usagers tout en maintenant la capacité de drainage du cours d'eau et la possibilité de circulation pour la faune aquatique.

6.3.2 Hydraulique des ponceaux

Dans l'aménagement d'un ponceau, les dimensions et le type de structure doivent offrir une capacité hydraulique suffisante sans causer un refoulement excessif. En ce sens, il devient important de connaître certaines notions de l'hydraulique des ponceaux. Il ne s'agit pas ici de présenter une étude exhaustive de l'écoulement dans une conduite fermée, mais plutôt d'en faire ressortir les grandes lignes directrices.

6.3.2.1 Types d'écoulement et calcul de la section

Il existe plusieurs méthodes de calculs hydrauliques pour déterminer la section d'un ponceau. Cependant, pour un choix rapide de la section minimale, l'utilisation de courbes de performance construites à partir des abaques contenus dans "Hydraulic Engineering Circulars, no 10", simplifie grandement le processus de design.

Suivant cette démarche, les caractéristiques d'écoulement d'un ponceau sont contrôlées par des conditions à l'entrée ou à la sortie.

1) Contrôle à l'entrée

L'expression "contrôle à l'entrée" signifie que la capacité de débit est limitée à l'entrée du ponceau par la hauteur de l'eau à l'entrée, par la géométrie de l'entrée, c'est-à-dire la forme du tuyau, par la section libre et le type de l'entonnement. Puisque la section de contrôle est à l'entrée, le débit n'est affecté par aucun des facteurs hydrauliques comme la pente, la longueur ou la rugosité de la conduite agissant au-delà de l'entrée du ponceau. Les ponceaux opérant sous contrôle à l'entrée couleront toujours partiellement remplis.

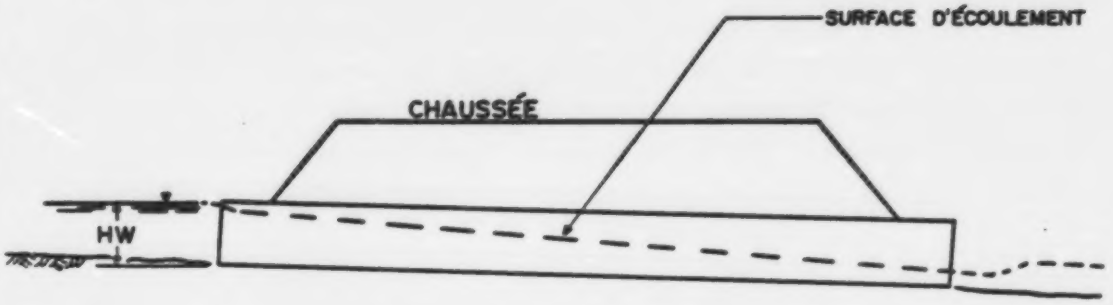
Afin de simplifier le processus de dimensionnement des ponceaux lorsqu'il y a contrôle à l'entrée, nous utilisons les courbes de performance présentées aux figures 6.6 à 6.10. Ces courbes nous donnent directement le diamètre ou les dimensions des conduites en fonction du débit et d'une hauteur d'eau à l'entrée du ponceau.

Étant donné que les ponceaux de ferme sont des structures "hydrauliquement courtes", ils opèrent dans la majorité des cas avec contrôle à l'entrée. La longueur moyenne de ces ponceaux privés dépasse rarement 8 mètres, et leur section et leur entonnement ont habituellement la priorité.

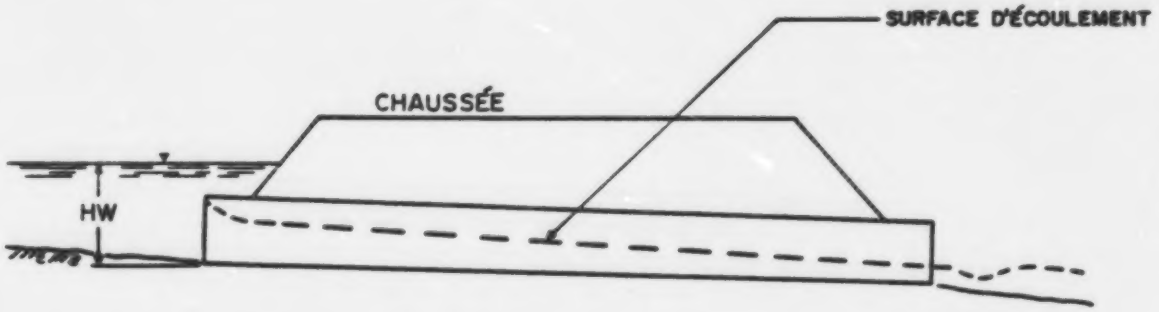
D'autre part, étant donné leur nature et les fins auxquelles ils sont destinés, ils ne doivent pas provoquer un refoulement excessif. Il faut tenir compte aussi de l'effet d'enfilade possible, c'est-à-dire du rehaussement de la ligne d'eau cusé par une succession de ponceaux. Lorsque le cours d'eau a une pente faible et que les ponceaux sont rapprochés, il suffit que l'un d'entre eux soit trop petit pour rendre inappropriés tous les ponceaux en amont qui peuvent avoir été construits suivant les exigences d'un bon drainage.

Figure 6.3

CONTRÔLE À L'ENTRÉE



EXTRÉMITÉS SAILLANTES — ENTRÉE NON-SUBMERGÉE



EXTRÉMITÉS SAILLANTES — ENTRÉE SUBMERGÉE

2) Contrôle à la sortie

Sous contrôle à la sortie, la section de contrôle est située à la sortie du ponceau ou près de celle-ci. La capacité hydraulique, pour toute forme ou diamètre de ponceau, dépend dans ce cas de tous les facteurs en amont de la sortie. Il y a contrôle à la sortie lorsque l'eau peut entrer dans le ponceau à un taux plus grand qu'elle ne peut en sortir. Les ponceaux opérant sous contrôle à la sortie peuvent couler soit partiellement remplis ou pleins.

Lorsqu'un ponceau opère avec contrôle à la sortie, la hauteur d'eau à l'entrée peut être exprimée par une équation mathématique quelle que soit la hauteur d'eau à la sortie. Pour les ponceaux de configuration circulaire, cette équation prend la forme suivante:

$$HW = H + H_O - S_O L \qquad \text{Eq. (1)}$$

$$H = \left(\frac{8{,}27\ (1 + Ke)}{D^4} + \frac{1029{,}29\ n^2 L}{D^{16/3}}\right)\left(\frac{Q}{10}\right)^2 \qquad \text{Eq. (2)}$$

HW : hauteur d'eau à l'entrée (m)
H : perte de charge totale exprimée en hauteur d'eau (m)
S_O : pente du ponceau (m/m)
L : longueur du ponceau (m)
Ke : coefficient de perte de charge à l'entrée
D : diamètre (m)
n : coefficient de rugosité de la conduite
Q : débit (m^3/s)

2.1 Sortie non submergée

Lorsque la hauteur d'eau à la sortie du ponceau (TW) est à un niveau inférieur à celui du sommet du ponceau, le terme H_o de l'équation (1) prend la plus grande des deux valeurs suivantes:

$$H_o = \frac{dc + D}{2}$$

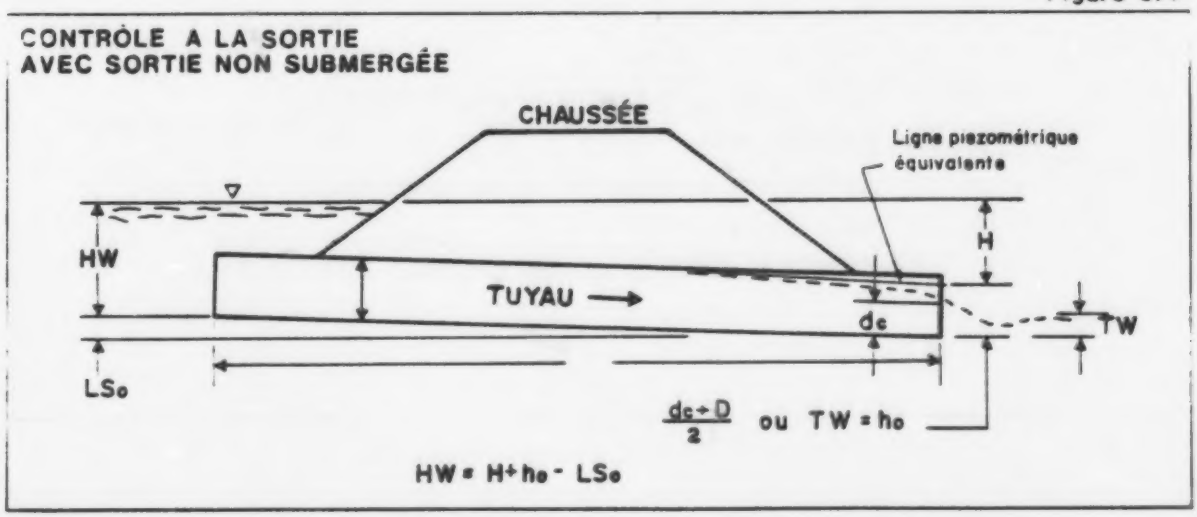
$$H_o = TW$$

Le terme "H_o" représente la distance verticale en mètres entre le radier du ponceau à la sortie et la ligne piézométrique équivalente. Les calculs des courbes de remous montrent que la ligne piézométrique, si elle est prolongée comme une ligne droite (fig. 6.4), coupera le plan de la section à la sortie du ponceau en un point situé au-dessus de la surface de l'eau (dc). Ce point est approximativement situé à mi-distance entre la profondeur critique et le sommet du ponceau.

$$dc = 0{,}083\ D + 0{,}483\ (Q/D)^{2/3} \quad (m)$$

Le terme "TW" représente la hauteur d'eau en mètres à la sortie du ponceau, lorsque le régime normal est rétabli.

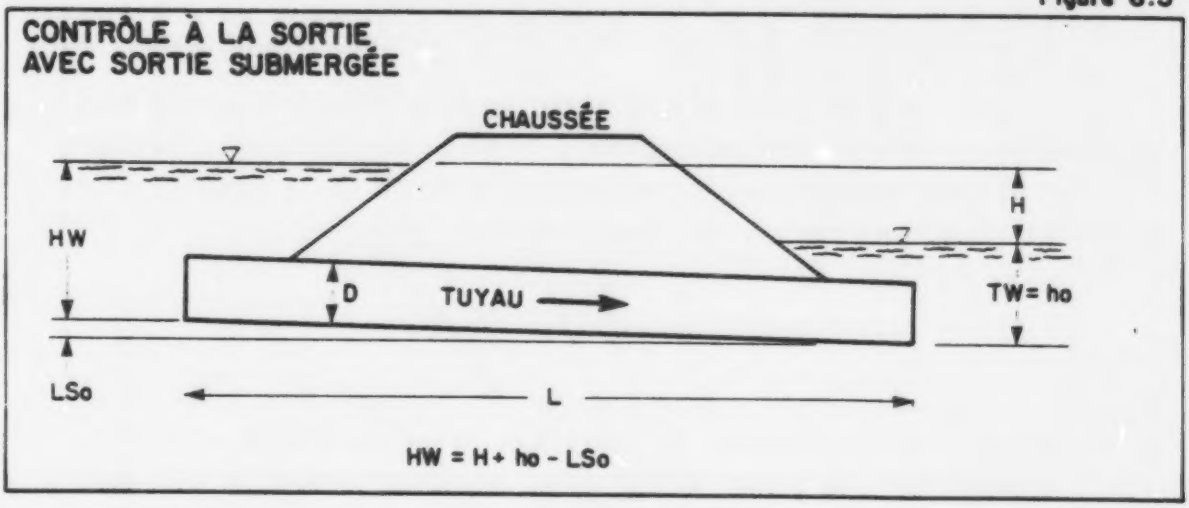
Figure 6.4



2.2) Sortie submergée

Sous les conditions de sortie submergée le terme TW devient égal ou supérieur à celui du sommet du ponceau à la sortie. On prend alors H_o égal à TW et on obtient HW au moyen de l'équation 1.

Figure 6.5



On peut également obtenir les mêmes résultats en utilisant les nomogrammes proposés à cette fin dans la publication "Hydraulic Engineering Circular no. 10".

6.3.2.2 Utilisation des courbes de performance

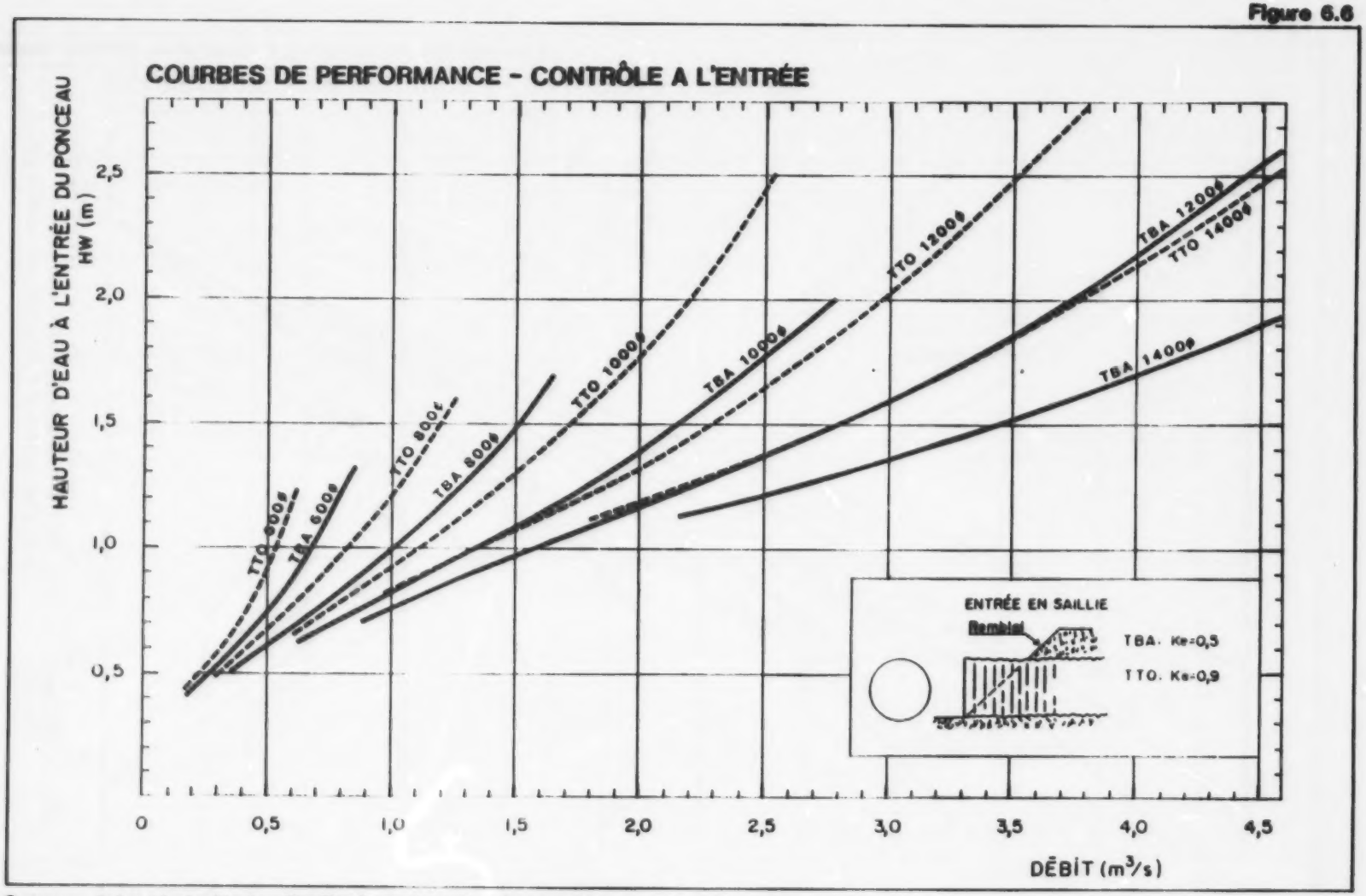
Tel qu'il a été mentionné précédemment, les ponceaux en milieu agricole opèrent le plus souvent avec contrôle à l'entrée. Les figures 6.6 à 6.10 représentent les courbes de performance pour le contrôle à l'entrée. Nous obtenons directement la hauteur d'eau amont en fonction du débit pour une section ou un diamètre donné. Les courbes de performance se limitent au type d'entrée en saillie du remblai puisqu'il représente la presque totalité des cas en milieu agricole.

Il se peut qu'un ponceau opère avec contrôle à la sortie sous certaines conditions déjà mentionnées. Il faut alors calculer la hauteur d'eau amont occasionnée par un contrôle à la sortie et la comparer à la hauteur d'eau maximale qui peut être tolérée à l'entrée.

Le calcul de HW s'effectue avec les équations 1 et suivantes en utilisant la section obtenue des courbes de performance pour le contrôle à l'entrée. La plus grande valeur de HW détermine le type de contrôle. Par exemple, il y a contrôle à la sortie lorsque la valeur de HW calculée s'avère supérieure à la hauteur maximale admissible fixée au départ pour le contrôle à l'entrée. Il faut alors reprendre les calculs en utilisant une section plus grande jusqu'à ce que la hauteur d'eau maximale admissible à l'entrée du ponceau soit respectée.

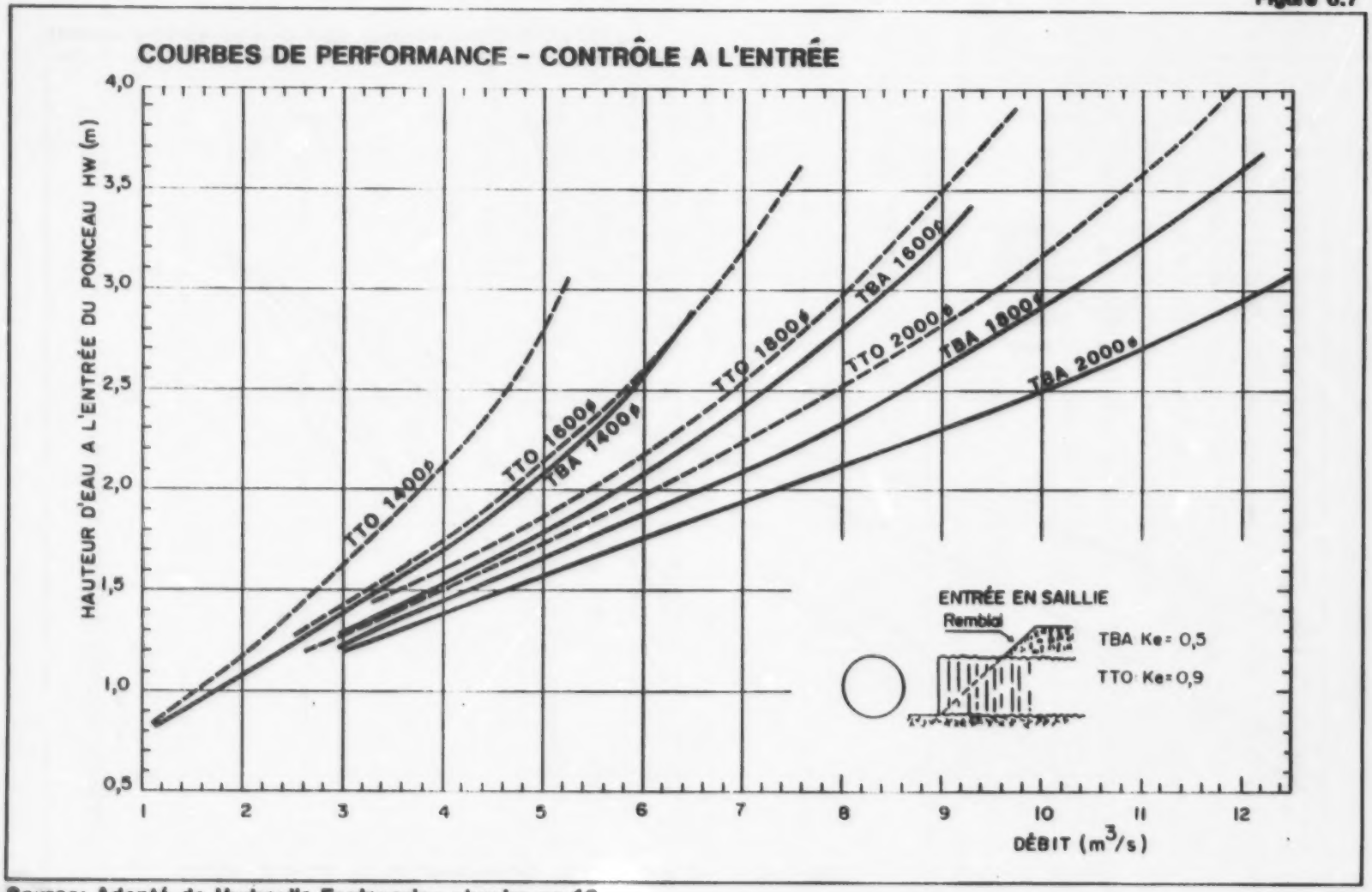
Les courbes de performance pour le contrôle à la sortie n'apparaissent pas dans ce document étant donné le nombre considérable de courbes à représenter pour couvrir toutes les situations possibles.

Figure 6.6



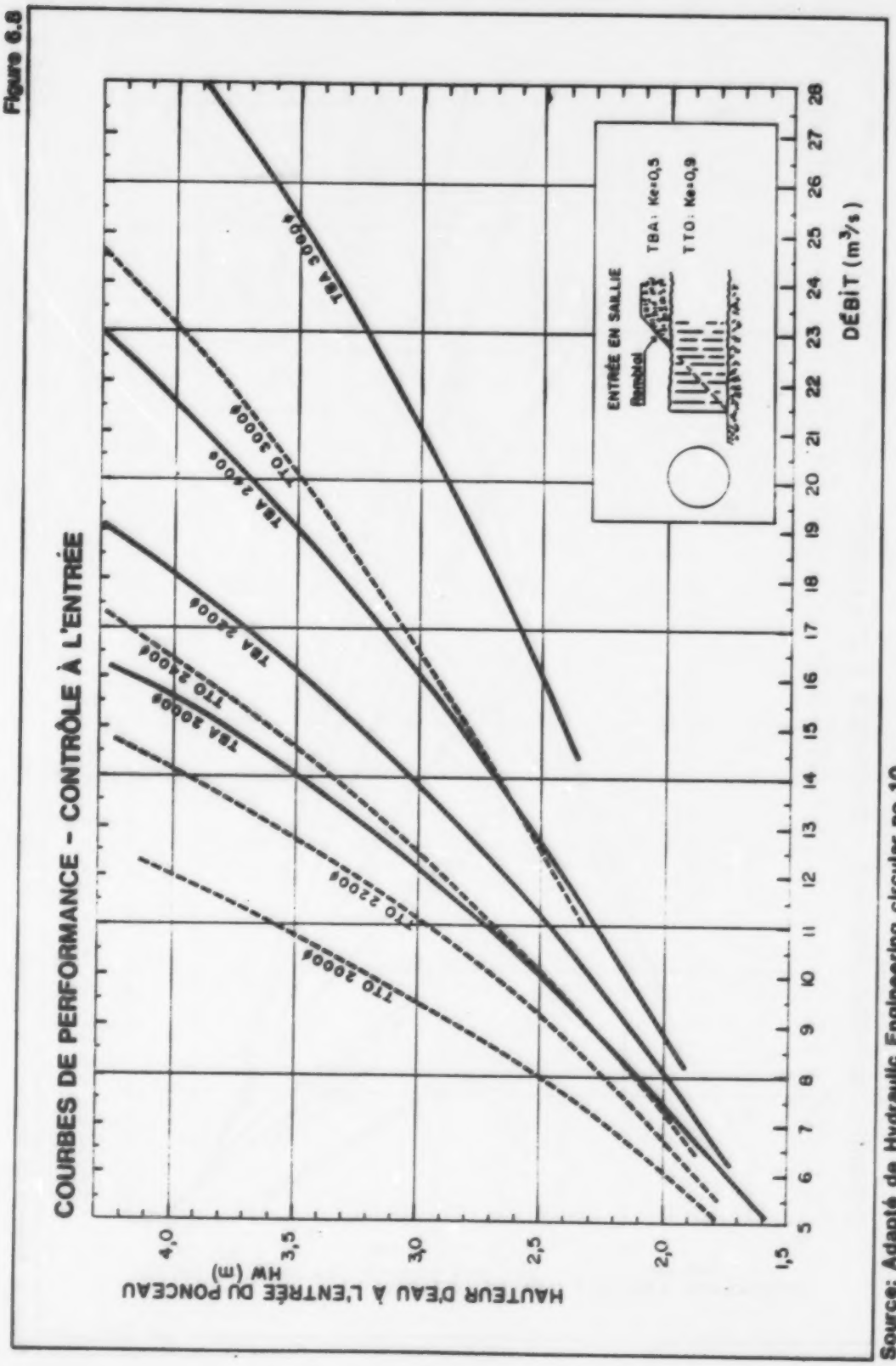
Source: Adapté de Hydraulic Engineering circular no. 10

Figure 6.7



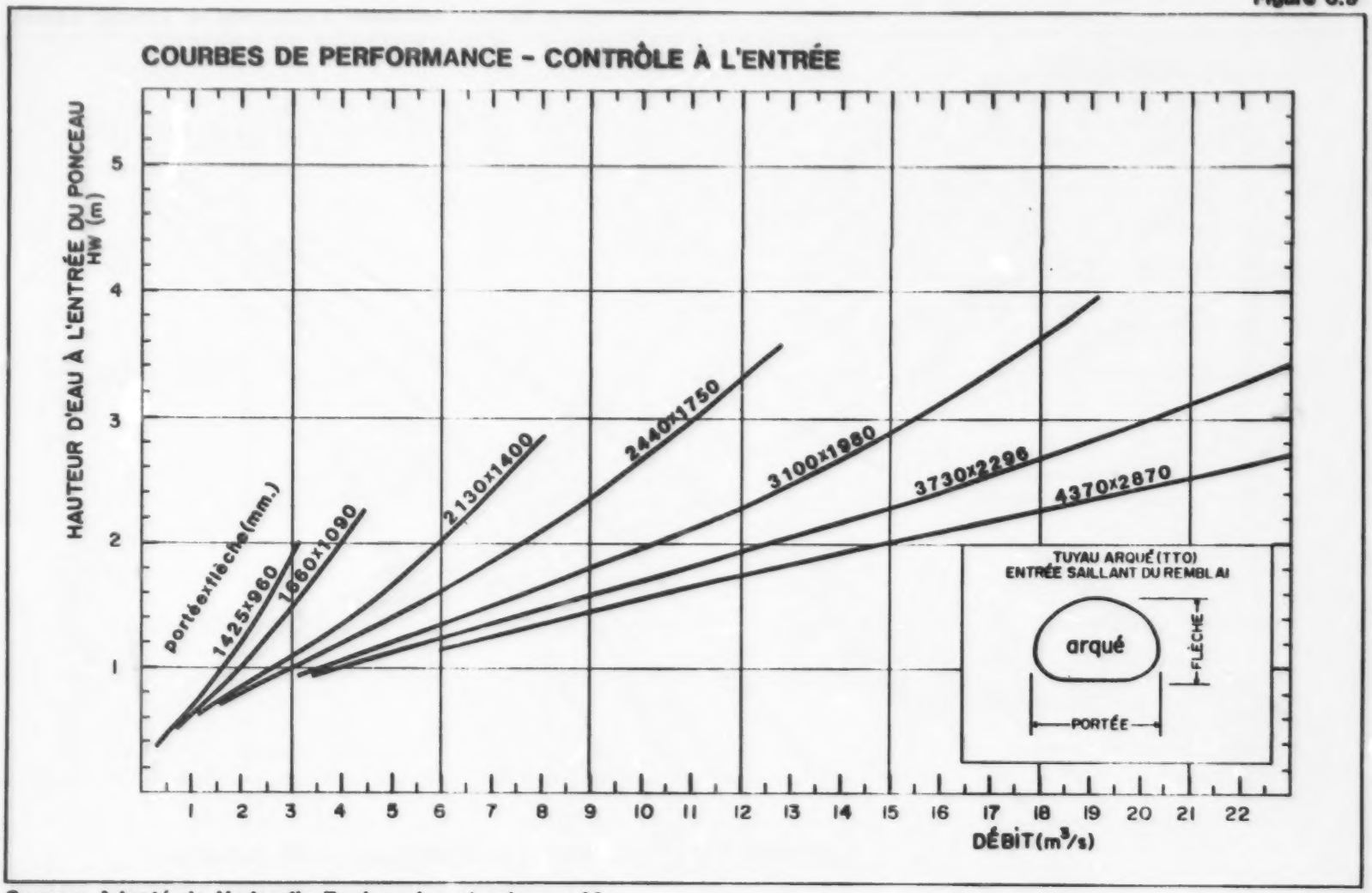
Source: Adapté de Hydraulic Engineering circular no.10

Figure 6.8



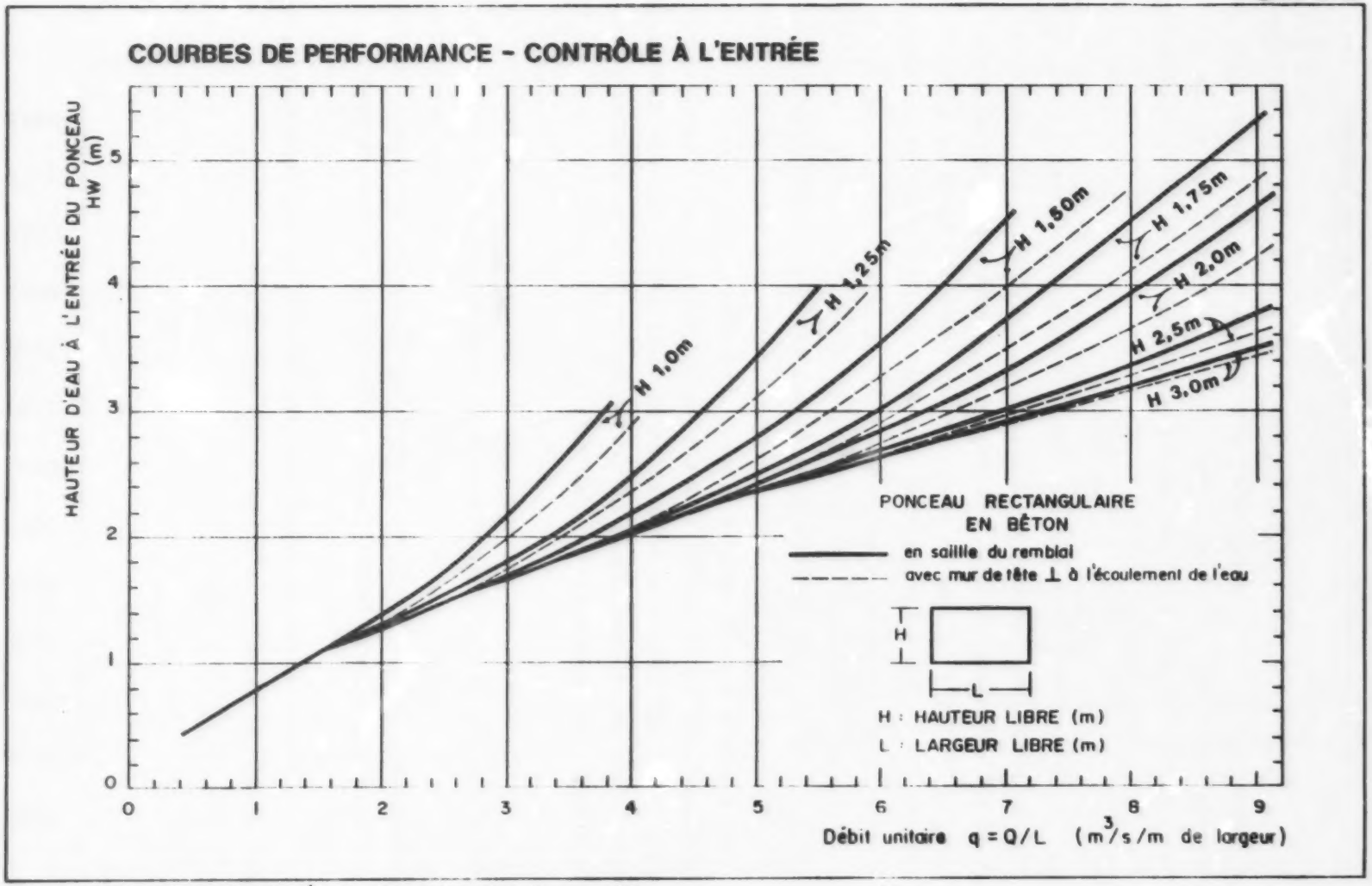
Source: Adapté de Hydraulic Engineering circular no.10

Figure 6.9



Source: Adapté de Hydraulic Engineering circular no. 10

Figure 6.10



Source: Adapté de Hydraulic Engineering circular no. 10

6.3.2.3 Considérations dans le choix final du ponceau

Dans le choix de la section d'un ponceau, il est préférable d'adopter une attitude sécuritaire afin que le choix ne contrevienne pas aux règlements municipaux en vigueur qui ne permettent pas d'obstruction dans le cours d'eau. Il faut également penser à améliorer l'évacuation des glaces lors du dégel.

Une bonne pratique consiste à limiter la hauteur d'eau amont "HW" au sommet de l'entrée du ponceau. Un débit d'une récurrence de 10 ou 25 ans est alors utilisé. La figure 6.11 donne le diamètre requis en fonction du débit lorsque la hauteur d'eau amont est égale au diamètre du ponceau (HW = D). Les courbes ont été établies pour le contrôle à l'entrée avec des tuyaux d'acier ondulé et de béton.

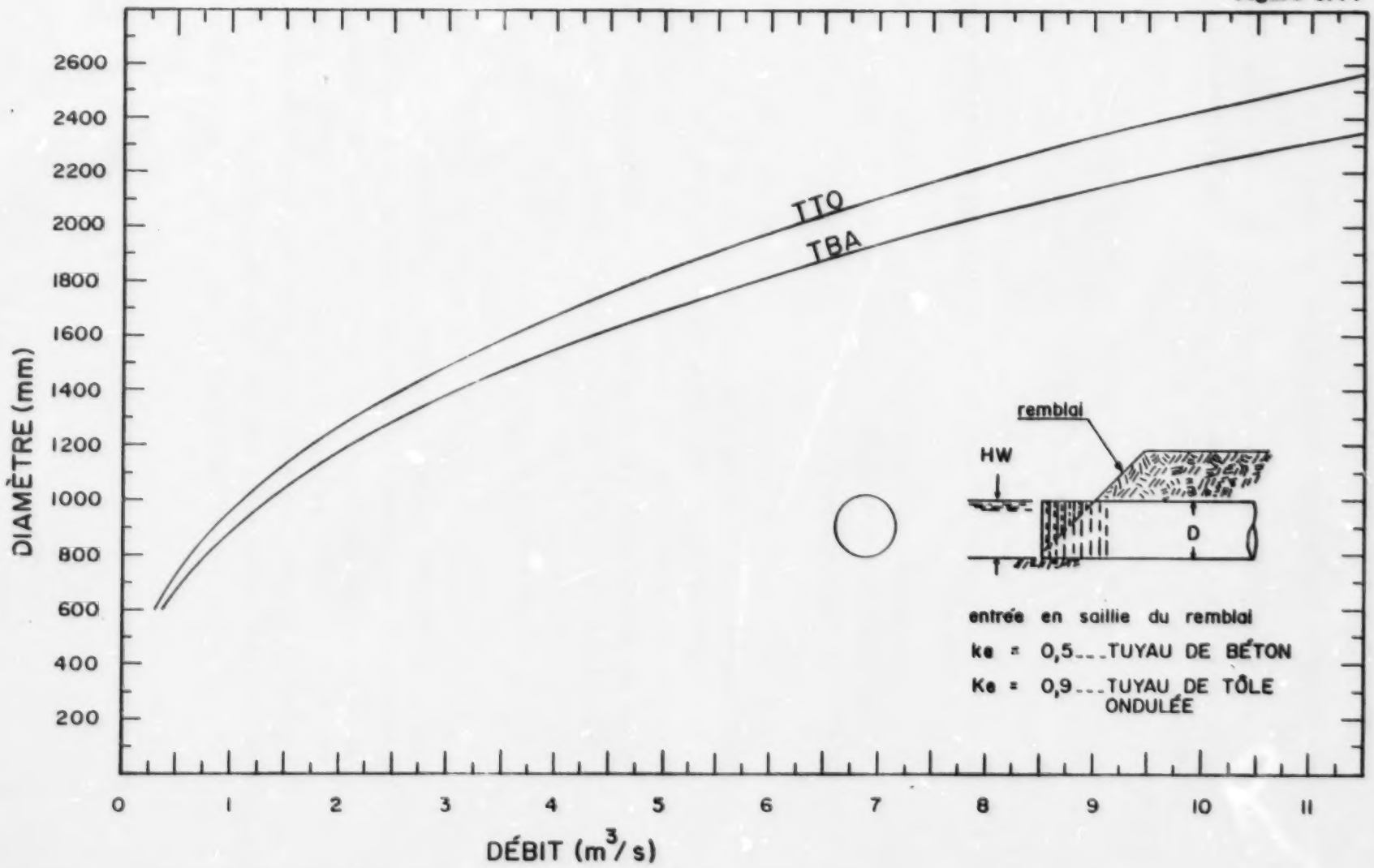
Selon cette méthodologie, la hauteur de la conduite peut s'avérer trop élevée en raison d'une hauteur limitée de remblai ou des dimensions disponibles. On utilise alors plusieurs ponceaux parallèles en répartissant également le débit entre les différentes structures envisagées. S'il est possible, on peut aussi augmenter la hauteur du remblai ou utiliser des tuyaux arqués ou encore des ponceaux rectangulaires dont la largeur est supérieure à la hauteur.

Sauf dans des cas spéciaux, la hauteur d'eau maximale admissible ne devrait pas être supérieure à la hauteur hydraulique pour laquelle le cours d'eau est conçu. Toutefois, il se peut que, pour des raisons économiques, on doive tolérer un certain refoulement à l'amont, surtout lorsque l'emprise est large (chemin de fer, route, section fermée).

Dans le cas de conduites circulaires, il est important de ne pas retenir un diamètre inférieur à 600 millimètres.

CHOIX DU DIAMÈTRE D'UN PONCEAU AVEC D=HW (CONTRÔLE À L'ENTRÉE)

Figure 6.11



6.3.3 Types de structures ou de ponceaux

L'étude économique des divers modes de construction permettra de déterminer le type de structure à utiliser selon les caractéristiques de chaque cours d'eau et du débit à évacuer.

Le choix final de la section du ponceau doit tenir compte des dangers d'érosion en aval de ce dernier.

La solution économique pour les cours d'eau ayant une envergure de faible à moyenne consiste en la mise en place de tuyaux remblayés.

On doit éviter l'utilisation des tuyaux en tôle ondulée arquée si on ne peut assurer un remblai bien compacté sur les côtés à une profondeur suffisante.

Le tuyau fait de polyéthylène noir de haute densité convient très bien pour la réalisation d'un ponceau. Ce tuyau ne rouille pas et ne se corrode pas. Il est léger, ce qui facilite son installation. Comme pour les autres types de ponceau, sa solidité provient en bonne partie des matériaux de remblayage de friction élevée. Le sol naturel bien tassé peut aussi servir d'enveloppe et de remblai.

6.3.3.1 Calculs structuraux

Les ponceaux en tuyau de béton et de tôle d'acier doivent être utilisés suivant les données techniques fournies par les fabricants. Les ponts avec poutres de béton armé, métalliques ou en bois doivent faire l'objet de calculs des charges.

En général, les ponts doivent résister au passage d'une charge vive "H-10" ou "H-20" selon les spécifications A.A.S.H.O. (American Association of State Highway Officials).

TUYAU	NORME QUÉBÉCOISE NO
Béton armé (TBA)	NQ2662-120
Béton (TB)	NQ2662-130
Annelé en acier (TTO)	NQ3311-100
Annelé en plastique	NQ3624-110

6.3.3.2 Mise en place

Le tuyau est mis en place légèrement en contrebas du lit du cours d'eau pour améliorer le facteur de sécurité contre les affouillements et les sous-pressions. Selon le diamètre du tuyau, le calage peut varier de quelques centimètres (de 10 à 20 cm).

Il peut être nécessaire pour des ponceaux d'aménager un coussin de support sous l'ouvrage si le fond de la tranchée est instable.

Dans le cas d'un pont avec culée, la largeur libre entre les culées ne doit pas être inférieure à celle du cours d'eau à la mi-hauteur hydraulique. On doit également s'assurer que les poutres soient placées à une élévation supérieure à celle des hautes eaux (exemple: hauteur hydraulique d'une récurrence de 10 ans).

Lors du remblayage, on s'assure de placer le matériau de remblayage des deux côtés du tuyau à la fois, afin d'éviter les déplacements dus aux poussées du sol. L'épaisseur minimale du remblai au-dessus des tuyaux doit respecter les prescriptions du manufacturier.

Le matériau de remblayage ne doit pas contenir de pierres, d'agglomérats gelés ou autres débris semblables.

6.3.4 Protection du ponceau

6.3.4.1 Mur de tête

S'il s'avère nécessaire de protéger l'ouvrage contre l'érosion, il faut construire à chaque extrémité de la conduite un enrochement avec de la pierre d'environ 300 mm. Ces pierres doivent être placées avec soin, enchassées et serrées solidement les unes contre les autres sans aspérités dépassant le demi-calibre moyen des pierres. Un mur de tête peut aussi être constitué de béton coulé ou de poutres de bois.

6.3.4.2 Protection contre l'érosion ou l'affouillement

La présence d'un ponceau sur un cours d'eau provoque dans la plupart des cas une contraction de la section mouillée entraînant une augmentation des vitesses à la sortie du ponceau. Il faut alors envisager une protection du lit par des ouvrages connexes de finition de bout.

Le type d'affouillement et son importance détermineront l'ampleur de la protection à envisager. Il est à noter ici que la complexité des problèmes reliés à l'affouillement rend difficile l'étude exhaustive pour un cas particulier.

Lorsque des mesures de protection s'imposent, on peut de façon économique créer un pavage en pierres sur toute la largeur du lit et sur une distance d'environ deux fois le diamètre du ponceau ou deux fois sa portée.

Dans certains cas d'affouillements graves, il est souhaitable d'utiliser des mesures de protection plus rigides, tels le radier en béton, les gabions et les sacs de sable et ciment.

6.3.4.3 Sédimentation au niveau du ponceau

Lorsqu'un ponceau doit être aménagé au voisinage d'un changement de pente, à l'entrée d'un lac, au confluent d'un cours d'eau plus important et, d'une manière générale, dans tous les cas où la vitesse de l'écoulement diminue, il est important de prévoir un rehaussement du lit du cours d'eau. L'ensablement réduit le dégagement vertical de la structure, ce qui a pour effet de contribuer à la formation d'embâcles au printemps.

Pour prévenir la sédimentation dans un ponceau, on évite de le localiser aux endroits où la vitesse d'écoulement diminue. Dans les cas critiques, on peut créer des bassins de sédimentation en amont des zones à protéger au moyen de seuils, d'élargissement ou d'adoucissement de pente.

On doit aussi privilégier des structures qui favorisent la concentration des débits d'étiage pour permettre le passage des poissons.

6.4 L'ENTRETIEN DES COURS D'EAU

L'aménagement d'un cours d'eau est un investissement important. Tous les efforts déployés pour préparer des projets de qualité exigent des attentions particulières.

Les riverains et les personnes concernées par l'aménagement des cours d'eau ont tous été à même de constater la régularité géométrique et l'efficacité hydraulique d'un cours d'eau fraîchement creusé dans des conditions propices.

Cependant, ces mêmes personnes ont aussi constaté la dégradation rapide de certains tronçons de cours d'eau. En effet, dès la première crue importante. Un cours d'eau aménagé nécessite un entretien périodique consistant à:

1. contrôler la végétation des talus;
2. contrôler la végétation aquatique;
3. enlever les dépôts de sédiments;
4. enlever les dépôts provenant des affouillements;
5. enlever les obstacles artificiels (débris, clôtures...);
6. stabiliser les zones d'affouillement;
7. corriger les tronçons affectés par l'érosion;
8. réparer les ouvrages d'art (ponts, ponceaux, barrages, accès pour les animaux).

Les travaux d'entretien ont pour objectif de garder le cours d'eau en bon état. Certains cours d'eau sont très stables et l'entretien consistera uniquement à couper des arbustes nuisibles sur les talus.

Il est nécessaire que le programme d'entretien permette d'intervenir rapidement lorsque des problèmes surviennent après l'aménagement d'un cours d'eau.

L'entretien relève de la responsabilité des individus ou de la corporation municipale. Lorsque des individus sont responsables de la dégradation de la qualité et du fonctionnement d'un cours d'eau, ils doivent faire l'entretien qui s'impose. C'est la corporation municipale qui a l'autorité pour faire exécuter ces travaux.

Lorsque des travaux d'entretien sont nécessaires et qu'ils ne sont pas dûs à l'action ou à la négligence des individus, ils sont à la charge de la corporation municipale.

Dans les cas où la dégradation des cours d'eau est due au piétinement des animaux ou à des mauvaises pratiques culturales, l'exploitant agricole est responsable des dégâts causés et doit faire les travaux d'entretien requis.

Lorsque des arbustes et des aulnes envahissent naturellement le prisme d'un cours d'eau, c'est à la corporation municipale de faire exécuter les travaux d'entretien.

Un fauchage annuel permet de contrôler la prolifération des mauvaises herbes et d'assurer la pérennité de la protection herbacée dans les talus et sur la berme. Une débroussailleuse montée à l'arrière d'un tracteur peut faucher les quenouilles et les plantes aquatiques qui nuisent à la libre circulation des eaux.

Les travaux d'entretien ne nécessitent pas d'études détaillées puisqu'ils consistent à garder efficace un cours d'eau réalisé à l'origine selon une étude technique appropriée. L'étude initiale est suffisante et c'est souvent l'inspection visuelle qui détermine les travaux.

6.5 ANNEXE 1

EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT D'UN PONCEAU

6.5 EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT D'UN PONCEAU

6.5.1 Première approche

I - DONNÉES:

CARACTÉRISTIQUES DE LA SECTION DU COURS D'EAU

largeur au fond	1,5	m
profondeur moyenne	1,5	m
inclinaison des talus	1:1,5	
pente du lit	0,004	

CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCOULEMENT DANS LE COURS D'EAU

débit avec une récurrence de 10 ans	2,0	m^3/s
hauteur hydraulique	0,67	m
vitesse	1,19	m/s

II - CONDITIONS À RESPECTER:

hauteur d'eau maximale (HW)	1,2	m
longueur de la conduite	6,0	m
pente maximale du ponceau	0,004	
utiliser un T.T.O. avec entrée en saillie du remblai	Ke =0,9	

III - SOLUTION

La solution proposée s'effectue en deux étapes. La première consiste à choisir la section minimale à l'aide des courbes de performances pour le contrôle à l'entrée. La deuxième étape permet de vérifier si la section préalablement choisie ne provoque pas une hauteur d'eau amont supérieure avec contrôle à la sortie.

1 - Les figures 6.6 à 6.10 permettent un choix rapide de la section minimale d'une conduite en fonction d'une hauteur d'eau à l'entrée et d'un débit donné.

figure 6.6.....T.T.O. de 1 400 mm avec HW = 1,18 m
figure 6.6.....T.B.A. de 1 200 mm avec HW = 1,17 m

2 - La détermination de la retenue d'eau (HW), lorsqu'il y a contrôle à la sortie, peut se faire à partir des abaques contenus dans "Hydraulic Engineering Circular no 10" ou par calculs à l'aide des équations (1) et suivantes, pages 6-11 à 6-13. Ces équations sont valables pour les tuyaux de forme circulaire.

3 - Calcul de HW avec contrôle à la sortie:

$$HW = H + H_o - S_oL$$

où

$$H = \left(\frac{8,27\ (1+Ke)}{D^4} + \frac{1029,29\ n^2\ L}{D16/3}\right)\left(\frac{Q}{10}\right)^2 = 0,187\ m$$

où

ke = 0,9 n = 0,024 D = 1,4 m Q = 2,0 m^3/s

$H_o = TW$ où $\frac{dc + D}{2}$

TW = 0,67 m

$dc = 0,083\ D + 0,483\ (Q/D)^{2/3} = 0,727$ m

$\frac{dc + D}{2} = 1,063$ m

$H_o = 1,063 = (dc + D)/2 > TW$

$S_oL = 0,004 \times 6,0\ m = 0,024$ m

HW (contrôle à la sortie) = 0,187 + 1,063 - 0,024 = 1,22 m

Dans cet exemple, la plus haute retenue d'eau à l'entrée du ponceau est occasionnée par un contrôle à la sortie. On admet alors que, sous les conditions exprimées, le ponceau opère avec contrôle à la sortie.

Comme la hauteur d'eau calculée est supérieure à la hauteur maximale à respecter (1,22 > 1,2), un diamètre plus grand doit être choisi. Un diamètre de 1 600 mm constitue alors le choix final pour un tuyau en tôle ondulée.

6.5.2 Seconde approche

Une bonne pratique dans le dimensionnement des ponceaux consiste à limiter la hauteur de la retenue d'eau amont à la partie supérieure du ponceau (HW = D). De cette façon, les ponceaux opèrent avec l'entrée et la sortie non submergée. L'utilisation des courbes de la figure 6.11 permet un choix rapide du diamètre en fonction du débit pour la condition exprimée.

En se référant aux données de l'exemple précédent, toutes les conduites en tôle ondulée d'un diamètre égal ou supérieur à 1 275 mm pourront laisser passer un débit de 2 m^3/s en maintenant une hauteur d'eau amont (HW) égale ou inférieure à 1 275 mm. Cette hauteur d'eau devient la hauteur maximale à respecter et l'on reprend les calculs de l'exemple précédent afin de vérifier si un contrôle à la sortie n'entraînerait pas une hauteur d'eau supérieure. Après calcul avec D = 1 275 mm, on obtient HW (sortie) = 1 270 mm. La hauteur calculée est inférieure à la hauteur d'eau maximale à respecter (1 270 $<$ 1 275) alors le ponceau opère avec contrôle à l'entrée.

On doit également vérifier si la hauteur de la lame d'eau retenue satisfait aux exigences de drainage des sols riverains. Lorsque cette hauteur s'avère trop élevée, on peut répartir le débit et sélectionner deux conduites avec la même hypothèse de départ: HW = D. Le choix d'un ponceau de forme différente peut également être envisagé.

Suivant cette pratique où l'entrée et la sortie du ponceau ne sont pas submergées, on s'aperçoit que la différence entre les hauteurs d'eau amont provoquées par un contrôle à la sortie et à l'entrée n'est que de quelques centimètres (0-10 cm). L'utilisation des courbes de performances pour le contrôle à l'entrée de la figure 6.11, constitue une vérification rapide de la section requise.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

Agriculture Canada, Érosion du sol par l'eau, publication #1083, 1961, 39 pages.

American society of agricultural engineers, Agricutural drainage outlets in open channels, ASAE EP 407, 1984.

Apman R.P., Otis M.B., Sedimentation and stream improvement, New York Fish and Game Journal, Vol. 12, juillet 1965, no.2, 10 pages.

Asselin, Rémi, Projet d'endiguement des terres en bordure du Lac St-Pierre entre St-Antoine de la Baie du Fevre et St-Jean Baptiste de Nicolet, Étude de faisabilité, Nicolet, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 1980.

Association québécoise des fabricants de tuyaux de béton Inc., Tubecon, Manuel technique, canalisations et éléments préfabriqués en béton, 1985.

Beauregard, G. et al., Guide de gestion 1980, Grandes cultures, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, février 1980.

Binesse, Michel, Protection et amélioration des cours d'eau: objectif faune aquatique, Québec, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Gouvernement du Québec, 1983, 153 pages.

Brakensiek, D.L. et al., Field Manual for Research in Agricultural Hydrology, U.S. Department of Agriculture, 1979.

Caron, Rosemond, Rapport d'étude d'impact de la rivière Chaude, Direction de protection du territoire agricole, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, mars 1983, 300 pages.

Caron, Vincent, Aménagement de la rivière Filkars (Fourchette), Québec, Service des analyses d'impact sur le milieu agricole, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, octobre 1984, 58 pages, non publié.

Caron, Vincent, Le drainage forestier: document synthèse, Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, mai 1983, 111 pages, non publié.

Caron, Vincent, Travaux de stabilisation des berges de la rivière Filkars (Fourchette), Québec, Service des analyses d'impact sur le milieu agricole, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, octobre 1984, 46 pages, non publié.

Carswell, R., Evaluation of the effectiveness of the U.T.R.C.A. drain maintenance program, Upper Thames River Conservation Authority, 1983.

Chow, V.T., Open-Channel hydraulics, Mc Graw-Hill, Civil Engineering Series, 1959, 680 pages.

Congrès annuel de l'ACFAS, L'érosion accélérée et anthropique, ses conséquences sur l'environnement, UQTR, 1983,103 pages.

Conlin, Mike, The effects of channelization on fish populations, Illinois Dept. of Conservation, septembre 1975, 4 pages.

Coote, D.R. et al., Reducing erosion of open channel drains in problem soils of the Ottawa St-Lawrence region, International Commission on Irrigation and Drainage, 12e congrès, 26 pages.

Coupland, Gary, Décision économique dans la planification des cours d'eau, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, janvier 1974.

Desforges, P. et Hoang V.D., Méthode permettant la construction d'un hydrogramme de crue pour des petits bassins versants, Comptes rendus du Symposium canadien d'hydrologie, Conseil national de recherches du Canada, Edmonton, 1977.

Dinger, Françoise, L'étude d'impact des aménagements de cours d'eau, Ministère de l'Agriculture de France, Fiche technique # 1, 87 pages.

Direction de la planification, Guide de l'analyse avantages-coûts, Secrétariat du Conseil du trésor du Canada, mars 1976.

Dodge, D., Biological Impact of sedimentation, Ministry of Natural Resources, (extrait: 4 pages).

Dowdy, L.D., Maintenance of open channels for surface drainage, ASAE, Paper no 84-2066, 1984, 3 pages.

Dupuis, Marie-France et al., Impacts en zones humides, Tome 1, CEMAGREF, étude # 171, avril 1981, 4 pages.

Dupuis, Marie-France, Impacts en zones humides, Tome 2, CEMAGREF, étude # 171, avril 1981, 116 pages.

École nationale d'administration publique, Analyse avantages-coûts et évaluation de projets, cahier du participant, janvier 1980.

Éditeur Officiel du Québec, Étude d'un modèle bidimensionnel pour le fleuve St-Laurent, rapport technique # 16, 1978.

Elema, H.M., Mechanical maintenance of ditches, Drainage Principles and applications, Publication 16, Vol. IV Design and management of drainage systems, Ch. 31, 1974, pages 237-259.

Ferland et al., Atlas des hauteurs, fréquences et durées des pluies au Québec méridional, Publication MP-51, Québec, Ministère de l'Environnement du Québec, 1974.

Frenette, Marcel, Introduction aux principes d'hydrologie et d'hydraulique des cours d'eau nordiques, tome 1 et tome 2, notes de cours, Québec, Université Laval, 1985.

Gadbois, Jacques, Analyse des bénéfices anticipés découlant des travaux d'aménagement de la rivière Filkars ou Fourchette, Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Direction de la planification, janvier 1983.

Gray, Donald M., Manuel des principes d'hydrologie, Conseil national de recherches du Canada, 1972.

Haan, C.T. et al., Hydrologic modeling of small watersheds, monograh #5, St-Joseph, Michigan, ASAE, 1982.

Hansen, Douglas R., Stream channelization: a symposium, Special publication # 2, Omaha, Neb., décembre 1971, pages 29-52.

Hansen, E.A., In-channel sedimentation basins: a possible tool for trout habitat management, U.S. Department of Agriculture, The progressive Fish Culturist, Vol 35, No 3, juillet 1973, 5 pages.

Hoang, V.D., Estimation des débits journaliers de crue printannière des rivières du Québec méridional, Ministère de l'Environnement du Québec, Publication HP-40, Québec, 1977.

Hoang, V.D., Tremblay R., Estimation des débits d'étiage d'été des rivières du Québec méridional, publication HP-37, Québec, Ministère des Richesses Naturelles, 1976.

Hooton, R.S. et Reid, D.S., Impact of stream channelization on fish and wildlife, Victoria, B.C., Dept. of Recreation and Conservation, septembre 1975, 15 pages.

Hydraulic Engineering Circular no. 10, Washington D.C., Hydraulic Branch, Bridge Division, Office of Engineering and Operations, Bureau of Public Roads, mars 1985.

I.L.R.I., Drainage principles and applications, Volume IV, Design and management of drainage systems, Publication 16, Wageningen, 1980.

Irwin, R.W., On-farm drainage benefit, University of Guelph, février 1981.

Kezdi, A., Handbook of soil Mechanics, Vol 1, Ed. Elsevier, 1974.

King, H.W. et al., Handbook of hydraulics for the solution of hydrostatic and fluid flow problems, Mc Graw-Hill, 1963.

Lagacé, Robert et al., Construction et aménagement des cours d'eau en milieu agricole, Département de génie rural, Université Laval, 275 pages, 1979.

Laroche, M., La gestion de projets de cours d'eau municipaux au Québec, Thèse de maîtrise, UQAM, juillet 1982, 158 pages.

Laroche, M. et Champagne, J., Les cours d'eau en milieu agricole, design et conception assistés par ordinateur, tome 1: logiciel sur l'évaluation des débits de pointe pour les petits bassins versants, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, mai 1986, 71 pages

Laroche, M. et Champagne, J., Les cours d'eau en milieu agricole, design et conception assistés par ordinateur, tome 2: logiciel sur l'évaluation des débits de pointe pour les grands bassins versants, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, décembre 1986, 118 pages.

Laroche R., Samson P. et Therrien, M., Projet d'aménagement des terres alluviales du Lac St-Pierre, Québec, SAIMA, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, juin 1984.

Lencastre, Armando, Manuel d'hydraulique générale, Paris, édition Eyrolles, 1984, 411 pages.

Mc Neely, Engineering Ltd., Design manual for open channel drainage in the Ottawa St-Lawrence Lowlands, Ottawa, Supply and services Canada and Agriculture Canada, février 1982.

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Aménagement de cours d'eau, Québec, Comité spécial de la section hydraulique de la Commission de génie rural du Conseil des productions végétales du Québec, mars 1985, document non publié

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Guide d'aménagement de cours d'eau en milieu agricole, Québec, Service des analyses d'impact sur le milieu agricole, Direction de protection du territoire agricole, mars 1985, document non publié.

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Manuel d'orientation du personnel technique de l'hydraulique agricole, Québec, 1966.

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Manuel de références techniques et économiques en agriculture, Québec.

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Notions d'hydrologie appliquées aux cours d'eau, Québec, Service de l'hydraulique agricole, mai 1978, document non publié.

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Travaux de drainage - Cahier de charges générales pour les travaux d'assainissement agricole et de conservation des eaux, Québec, 1979, 83 pages.

Ministère de l'Environnement du Québec, Annuaire hydrologique 79-80, Publication AH-21, Québec, 1980.

Mills, Harlow, Starrett, B. et Bellrose F.C., Man's effect on the fish and wildlife of the Illinois River, Biological notes no 57, Urbana, Illinois Natural History Survey, juin 1966, 24 pages.

Monfet, Jean, Évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée, Québec, Service de l'hydrométrie, Ministère de l'Environnement du Québec, Publication HP-51, août 1979

Monfet, Jean, La construction de l'hydrogramme unitaire synthétique, Service des eaux de surface, Québec, Direction des inventaires et de la recherche, Ministère de l'Environnement du Québec, publication HP-53, 1981.

Nunnally, Nelson R., Improving channel efficiency without sacrificing fish and wildlife habitat: the case for stream restoration, Proceedings of Symposium: Strategies for protection and management of floodplain wetlands and other riparian ecosystems, decembre 11-13 1978, U.S. Dept. of Agriculture, 6 pages.

O'Shaughnessy, Wilson, Introduction aux mathématiques financières, seconde édition, Éditions SMG, UQTR, 1978.

Paquet, Gilles, Comment restaurer un petit cours d'eau altéré par une coupe forestière, Québec, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Direction Générale de la Faune, juillet 1982, 12 pages.

Poirée, M. et Ollier C., Assainissement agricole: drainage par tuyaux ou fossés, aménagement des cours d'eau et émissaires, Paris, édition Eyrolles, 1978.

Portland Ciment Association, Handbook of Concrete Culvert Pipe Hydraulics, Illinois 60076, 1964, 267 pages.

Provine, C. W., The effects of stream channelization on natural fish populations: a review, 9 pages.

Richer L. R., L'étude préliminaire d'un projet agricole par le biais de la référence au roulement de capital en production laitière, Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, septembre 1983.

Schoof, Russel, Environmental impact of channel modification, Water Resources Bulletin, American Water Resources Association, Vol 16 no 4, août 1980, 5 pages.

Schwab, G. O. et al., Soil and Water Conservation Engineering, seconde édition, Wiley, 1966.

Scott, Crossman, Poisson d'eau douce du Canada, Ottawa, Bull. 1984, Office des recherches sur les pêcheries du Canada Environnement Canada, 1974, 1026 pages.

Soil Conservation Service, U.S. Departement of Agriculture, Engineering Division, Design of open channels, Technical release no. 25, Washington D.C., octobre 1977.

Soil Conservation Service, U.S. Departement of Agriculture, Watershed plan and environmental impact statement for Bois d'arc Bayou watershed, 1978, 101 pages.

Sowers G. B., Sowers G. F., Introductory Soil Mechanics and foundations, 3e édition, Mac Millan, 1970.

St-Louis, Robert, Le calcul de la rentabilité du drainage des terres agricoles, Colloque de génie rural, Université Laval, 30 janvier 1974.

Strangler, M. G. and Handy, R. L., Soil Engineering, 4e édition, Harper and Row, 1982.

Streeter, V. L. and Wylie E. B. Fluid Mechanics, Mc Graw-Hill, 1975.

Swales, Stephen, Environmental Effects of River Channel Works used in Land Drainage Improvement, Liverpool University, England, Journal of Environmental management, 1982, pp. 103-126.

Terzaghi and Peck, Soil Mechanics in Engineering Practice, second edition, Wiley, 1967.

Trans-Canada Pipelines, Cahier des mesures générales de mitigation en milieu agricole, juin 1981, 53 pages.

Treyre, François, Défense des berges de rivière par des végétaux, Paris, Éditions Manpas, 1980, 64 pages.

Vézina, Luc, Rapport sommaire et préliminaire de l'étude sur l'ensemencement de graminée sur les berges de cours d'eau, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 1986, non publié.

White, Ray J. et Brynildson Oscar, Guidelines for management of trout stream habitat in Wisconsin, Wisconsin Department of natural ressources, technical Bull. Number 39, 1967, 61 pages.

Gouvernement du Québec
Ministère de l'Agriculture,